

## Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs

### Responses of *Cedrus atlantica* when faced with past and future climatic changes

Maxime DEMARTEAU(1), Louis FRANCOIS(1), Rachid CHEDDADI(2) & Emile ROCHE(1)

**Abstract:** This work addresses the responses of the Atlas Mountain Cedar tree (*Cedrus atlantica* Manetti) when faced with past and future climatic changes. The ecological study of this species proposes three simulations based on reliable and precise data:

- Simulation in 6000 B.P. with the GCM UBRIS-HadCM3M2 climatic data
- Simulation in the year 2000 with NEW et al. climatic data (2002)
- Simulation in the year 2100 with the ARPEGE Climatic Model data - following the IPCC's scenario A2

These simulations were realized using the CARAIB model, which simulates Carbon stocks in vegetation and Carbon flux between vegetation, soil and atmosphere.

In part one, the Moroccan Atlas Mountains, which constitute the principal natural area of the Atlas Cedar tree are described in detail. The different data describing this species' distribution at three periods are summarized: 1) at the present time, 2) at Holocene period and 3) at the end of the Upper Pleniglacial period. The distribution of the species is specified. A map of the Cedar tree's actual distribution in Morocco was drawn from a series of population maps - scale 1/25,000- kept at the Moroccan Ministry of Forestry and Water conservation.

So as to improve the sequential study of fossils of Cedar pollen was defined the percentage threshold at which samples containing pollen from the *Cedrus atlantica* are described as autochthonous or allochthonous. The study of 514 samples of Moroccan Cedar pollen permitted to define this threshold as 1% with minimal risk of error.

The last part of the work is focused on modelling. It starts with a description of IBM and CARAIB models used in the three simulations. The data essential for these models are reviewed. Considering the climatic data for these three periods, climate is globally warmer in 6000 BP and in 2100 than today, with the problems of drought becoming more severe in the future.

The analysis of the three simulations brings us to two conclusions. *Cedrus atlantica* is sensitive to climatic change and shows that, at three different periods, its potential distribution areas are quite different. At 6000 BP, the species sought refuge in the high mountains of North Africa. Today's distribution is well simulated in our model. Its good survival in Europe makes it an interesting species for reforestation. In 2100, if IPCC's A2 scenario is validated, modifications in the Cedar's potential and real area of distribution will be considerable. The tree will find little refuge in North Africa. On the other hand, the climate of the land between the Northern Alps and the South of Sweden, associated with a strong concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere may well provide it with an acceptable environment.

Key words: *Cedrus atlantica*, Past and future climatic changes, Modelling.

**Résumé:** Ce travail a eu pour objectif d'étudier la réponse du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux changements climatiques passés et futurs. Une recherche sur l'écologie de cette espèce a été effectuée afin de proposer trois simulations reposant sur des données précises et fiables :

- une à 6000 B.P. avec les données climatiques du GCM UBRIS-HadCM3M2,
- une en 2000 avec les données climatiques de NEW et al. (2002),
- une en 2100 avec les données climatiques du modèle ARPEGE, d'après le scénario A2 de l'IPCC.

Ces simulations, réalisées à l'aide du modèle CARAIB, simulent les stocks de carbone de la végétation et les flux de carbone existant entre la végétation, l'atmosphère et le sol.

Dans la première partie, les montagnes marocaines, constituant l'essentiel de l'aire naturelle du Cèdre de l'Atlas, sont décrites. La répartition de l'espèce est analysée avec une attention particulière. Les différentes données se rapportant à son aire de distribution pour la fin du Pléniglaciaire supérieur,

(1) Université de Liège (Belgique)

(2) Université Montpellier II (France) - Institut des Sciences de l'Evolution - CNRS UMR 5554

pour l'Holocène et pour la période actuelle sont résumées. Une carte de sa distribution réelle actuelle au Maroc a été dressée à partir de cartes de types de peuplements au 1/25.000<sup>ème</sup> conservées par le Ministère marocain des Eaux et Forêts.

Afin d'améliorer l'étude des séquences fossiles contenant des pollens de cèdre, le seuil de pourcentage pollinique à partir duquel les échantillons contenant des pollens de *Cedrus atlantica* sont autochtones ou allochtones a été défini. L'étude de 514 échantillons polliniques marocains a permis de fixer ce seuil à 1% sans trop de risques d'erreurs.

La dernière partie est consacrée à la modélisation proprement dite. Elle débute par la description des modèles IBM et CARAIB employés pour les trois simulations et les données nécessaires aux modèles sont passées en revue.

Considérant les données climatiques pour les trois époques, on constate qu'il fait globalement plus chaud à 6000 B.P. et en 2100 qu'actuellement et que les problèmes d'aridité seront plus sévères dans le futur.

De l'analyse des trois simulations réalisées à l'aide de ces modèles peuvent être tirées les conclusions suivantes : *Cedrus atlantica* est sensible aux changements climatiques et montre pour ces trois périodes des aires de distribution potentielle très différentes.

A 6000 B.P. il devait être réfugié sur les hauts sommets d'Afrique du Nord.

Son aire réelle actuelle est bien simulée par le modèle. Sa productivité potentielle élevée en Europe pourrait en faire une espèce à considérer pour les reboisements.

En 2100, si le scénario A2 de l'IPCC se vérifie, les modifications dans ses aires de distribution potentielle et réelle seront considérables. Il ne trouvera que peu de refuges en Afrique du Nord. Par contre, le climat des territoires compris entre le nord des Alpes et le sud de la Suède, associé à la forte concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, pourrait admirablement bien lui convenir.

Mots clés : *Cedrus atlantica*, Changements climatiques passés et futurs, Modélisation.

## INTRODUCTION

### Problématique

Dans la longue histoire que constitue l'évolution de la vie, l'homme figure comme une exception. En effet, depuis toujours, les espèces sont tributaires de leur environnement et doivent s'y adapter. Or l'être humain est le premier animal à pouvoir s'affranchir presque totalement de cette pression. C'est également lui qui est le plus en mesure de modifier son milieu de vie. Les rôles sont en quelque sorte inversés : ce n'est plus l'environnement qui exerce une pression sur l'espèce humaine, c'est l'espèce qui fait pression sur l'environnement.

Parmi les modifications que l'activité humaine induit, les changements climatiques

sont certainement l'une de celles qui attirent le plus l'attention. Cet intérêt est justifié car l'impact que peuvent avoir ces changements climatiques est énorme. La fonte des glaces, une répartition des ressources hydriques modifiée, la perturbation des écosystèmes voire la disparition de différentes espèces animales ou végétales, ne sont que quelques-unes des conséquences possibles de l'évolution du climat (Figure 1). Une autre particularité de ces modifications est qu'elles peuvent se produire dans une période de temps très brève.

Conscients de ces problèmes, l'Organisation Mondiale Météorologique (OMM) et le Programme des Nations

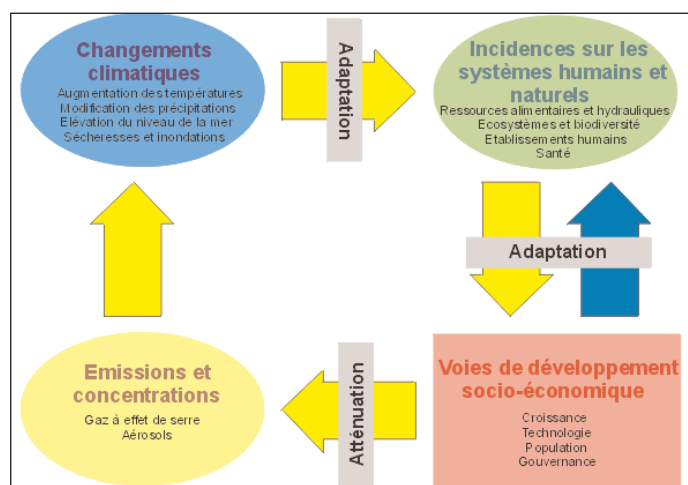


Fig.1: causes et effets des changements climatiques (IPCC, 2001). Les flèches jaunes indiquent les cycles de causes et effets; la flèche bleue indique la réponse sociétale aux effets des changements climatiques.

Unies pour l'environnement (PNUE) ont fondé en 1988 le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC en anglais : « Intergovernmental Panel on Climate Change ») chargé d'étudier la question. Deux conclusions importantes ressortent du troisième rapport du GIEC, daté de 2001. Premièrement, les observations à l'échelle mondiale indiquent que l'augmentation de température à la surface du globe au cours du XX<sup>ème</sup> siècle dans l'hémisphère Nord a été plus importante qu'au cours de tout autre siècle du dernier millénaire. Deuxièmement, les précipitations ont augmenté de 5 à 10 % au cours du XX<sup>ème</sup> siècle dans l'hémisphère Nord, sauf dans certaines régions, comme l'Afrique du Nord, où elles ont diminué et où l'on constate une augmentation de la fréquence et de l'intensité de la sécheresse (IPCC, 2001).

Le GIEC a réalisé plusieurs projections de l'évolution climatique pour ce siècle. Ces projections se basent sur quatre familles de scénarii (A1, A2, B1 et B2) qui recouvrent quatre combinaisons de variations : démographiques, développement socio-économique, et évolutions technologiques majeures. Pour 2100, il ressort de ces projections une augmentation de la température moyenne mondiale (Figure 2) comprise entre 1,4°C selon le scénario B1 et 5,8°C selon le scénario A1. Les modifications de l'intensité et de la fréquence des précipitations seront tout aussi importantes. A l'échelle régionale, les augmentations et diminutions prévues sont de l'ordre de 5 à 20%.

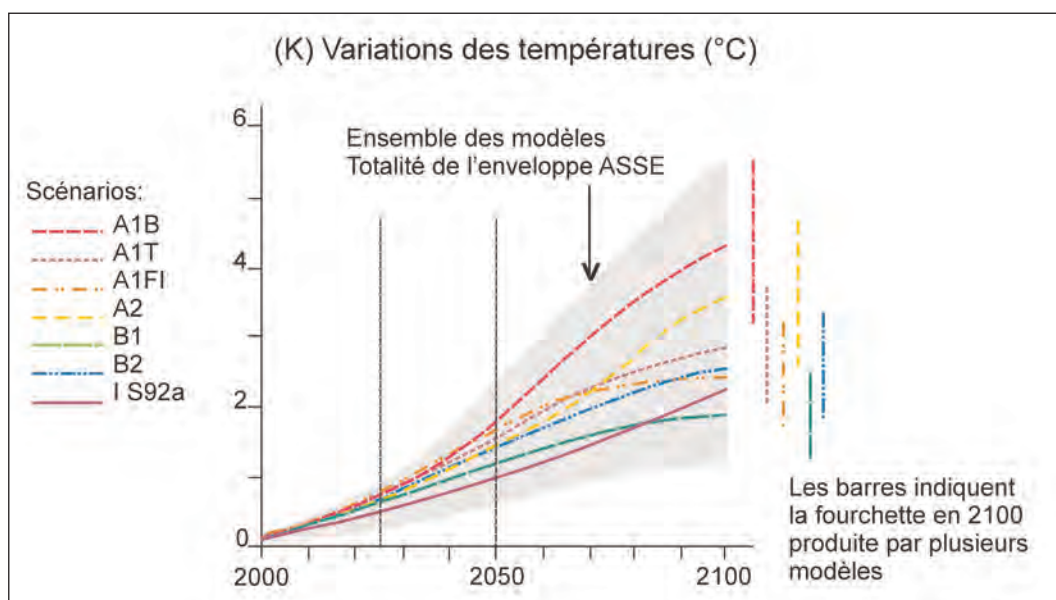


Fig.2: évolution des températures jusqu'en 2100 (IPCC, 2001)

Quiconque possède des notions de paléontologie ou de biologie sait que des changements climatiques d'une telle ampleur affecteront les systèmes environnementaux et la biodiversité. Les réponses des écosystèmes face à cette pression peuvent être de trois types : adaptation des espèces (généralement par des évolutions physiologiques), migration ou disparition. Malheureusement, les modifications climatiques prévues se produiront en peu de temps et ne laisseront pas toujours l'occasion aux écosystèmes de s'adapter, ce qui pourrait provoquer de véritables catastrophes écologiques. Il est du devoir de l'homme de réagir pour éviter que ces catastrophes aient lieu. La modélisation, en anticipant les variations que connaîtront les aires de répartition potentielles des espèces peut offrir des pistes pour leur sauvegarde. C'est pourquoi elle constitue un remarquable outil au service de la préservation de la biodiversité de notre planète.

## Objectifs

L'espèce végétale étudiée dans ce travail, *Cedrus atlantica* ou Cèdre de l'Atlas, n'est peut être pas la plus importante ou la plus nécessaire des réalités naturelles d'Afrique du Nord mais c'est certainement l'une des plus prestigieuses. Elle représente l'essence noble par

excellence des pays constituant son aire naturelle : le Maroc et l'Algérie. Le simple fait d'avoir associé « Atlas » au nom de l'espèce traduit toute son importance.

Etablir des projections n'est possible que si l'on maîtrise suffisamment bien le présent, voire le passé. C'est dans ce sens que ce travail propose la réalisation de simulations pour trois époques différentes, à l'aide d'un modèle (CARAIB) simulant les flux de carbone et les aires de distribution de groupes de plantes ou d'espèces. Ainsi, on se propose d'établir sur base de ce simulateur :

- l'aire de distribution potentielle du Cèdre de l'Atlas en 2000,
- son aire de distribution potentielle il y a 6000 ans,
- son aire de distribution potentielle à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle.

L'influence du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère sur la productivité est discutée. Le modèle CARAIB étant généralement utilisé pour simuler des répartitions de groupes de végétaux ayant les mêmes affinités bioclimatiques (BAGs), ce travail apporte également des informations quant à son possible usage pour traiter le cas d'espèces isolées.

Préalablement à la partie modélisation qui clôture cette étude, l'espèce *Cedrus atlantica* et son milieu de vie sont décrits. Une attention particulière est apportée au détail de la distribution passée et actuelle de l'aire de distribution du cèdre de l'Atlas. C'est dans ce cadre qu'une carte de son aire actuelle de distribution réelle est établie.

Les apports de la palynologie sont ensuite abordés. La distinction entre pollens autochtones et allochtones est discutée en se basant sur l'étude de 514 échantillons polliniques marocains.

La dernière partie présente le modèle CARAIB et précise les données qu'il requiert. Les simulations peuvent alors être réalisées et certaines conclusions présentées.

## DONNEES

### Le Maroc

Modéliser la répartition d'un arbre nécessite une certaine connaissance de son habitat. Ainsi, avant d'aborder la distribution de *Cedrus atlantica*, il convient de détailler certains aspects de son milieu de vie.

Le Cèdre de l'Atlas est endémique de l'Algérie et du Maroc, mais c'est au Maroc qu'il est de loin le mieux représenté. Son aire d'implantation y est approximativement cinq fois plus grande qu'en Algérie. Pour cette raison, c'est ce pays qui servira de « référence » et qui sera détaillé dans le travail. L'essentiel des données propres à *Cedrus atlantica* ont ainsi été collectées sur le territoire marocain.

### *Situation géographique*

Le Maroc est un état de 710.000 km<sup>2</sup>, Sahara occidental inclus. La description qui suit ne tient pas compte de ce dernier. Cette simplification est motivée par l'absence des cèdres dans cette zone désertique.

D'après la carte de l'I.G.N. (2006), le Maroc est compris entre 27° et 36° de latitude nord ; entre 1° et 13° de longitude ouest. Ses limites sont la Mer Méditerranée au nord et l'Océan Atlantique à l'ouest. Une Algérie fort désertique borde l'est et le sud du Maroc, avec des reliefs plus montagneux dans sa partie nord.

Le Maroc est un pays très varié au point de vue du climat et de la végétation. Cette diversité est notamment due à des gradients latitudinaux et altitudinaux assez importants auxquels viennent s'ajouter les influences atlantiques et méditerranéennes.

### *Géologie et relief*

Le Maroc compte trois chaînes de montagnes (figure 3) dues à des phases orogéniques



distinctes (TILL, 1985), de plus en plus anciennes en allant du nord au sud :

- le domaine alpin du Rif
- le domaine hercynien des Atlas
- le domaine précambrien de l'Anti Atlas

Le Rif surplombe la Mer Méditerranée tout au nord du pays. C'est la plus petite et la moins élevée des chaînes de montagnes marocaines. Il s'étire d'ouest en est sur environ 350 km et peu de ses sommets dépassent 2000 mètres d'altitude.

L'Atlas s'étire du sud-ouest au nord-est dans le centre du pays. Avec 500 à 600 km de long, c'est la plus importante chaîne de montagne du Maroc. C'est également la plus haute. Elle culmine à 4165 mètres au Jbel Toubkal et plus de trente autres sommets dépassent 3000 mètres d'altitude. En fait, l'Atlas regroupe deux chaînes de montagnes : le Moyen Atlas plus septentrional et le Haut Atlas plus méridional.

L'Anti Atlas est parallèle à l'Atlas ; il s'étire jusqu'à l'Océan Atlantique. Moins élevé, il culmine à 2530 mètres au Jbel Aklim.

Entre ces différentes chaînes de montagnes, on trouve des plateaux et des plaines au relief moins accentué. *Cedrus atlantica* ne peuple que le Rif, le Moyen Atlas et le Haut Atlas, il est absent de l'Anti Atlas, plus au sud.

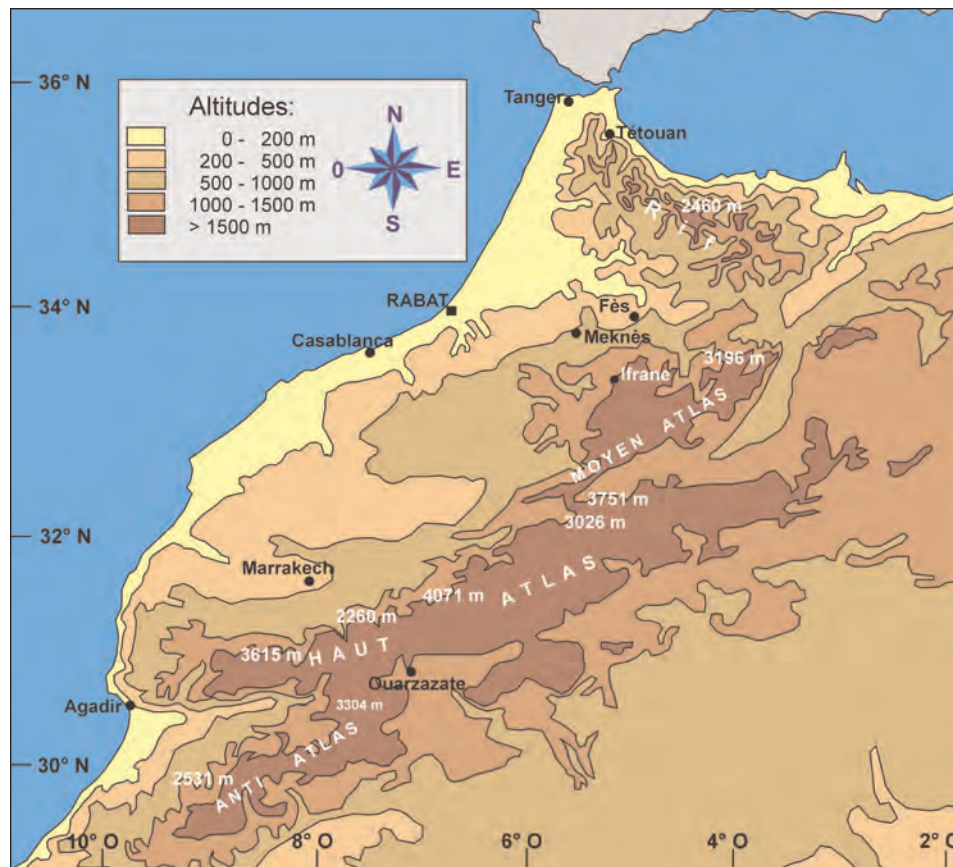


Fig.3: Maroc - Orographie

## Climat

D'une manière générale, la position géographique du Maroc lui confère un climat méditerranéen, c'est-à-dire caractérisé par une saison sèche et chaude en été et une saison douce et humide en hiver.

Plus localement, ce climat varie entre des extrêmes soit plus chauds et arides, avec moins de 400 mm/an de précipitations (climat subtropical), soit plus froids et humides, avec plus de 800 mm/an de précipitations (climat tempéré océanique à froid).

Ces différences de climat sont dues à des variations aussi bien latitudinales qu'altitudinales. La proximité de l'océan Atlantique, de la mer Méditerranée et du Sahara joue

également un rôle important dans ces différences.

En terrain montagneux, l'exposition des versants peut engendrer des microclimats. Ainsi les versants à exposition nord et ouest sont souvent plus frais que les versants sud et est qui connaissent une insolation et une évaporation plus importantes.

Les précipitations, souvent concentrées sur les mois froids de l'année sont généralement apportées par les vents du nord et de l'ouest (Gharbi). Le reste du temps, des vents chauds et secs (Chergui) viennent du sud et de l'est et accentuent l'évapotranspiration.

L'Atlas et le Rif sont parmi les régions les plus arrosées du Maroc. Les précipitations s'y font généralement sous forme de pluie ou de neige. Il n'est pas rare que les cédraines connaissent jusqu'à 30 jours de neige par an et que celle-ci persiste pendant 4 à 5 mois. Les brouillards et la rosée constituent une partie non négligeable du bilan hydrique de ces régions.

Cette situation est valable actuellement, mais elle est, semble-t-il, amenée à changer durant le siècle à venir. En effet, l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) prévoit des diminutions de 20 à 30 % des précipitations et des augmentations de températures de 2 à 3°C au Maghreb (CHEDDADI *et al.*, 2001).

## **Végétation**

La variabilité du climat et des paysages n'est évidemment pas sans répercussions sur la flore marocaine qui est très riche en espèces. C'est d'ailleurs l'un des pays du pourtour méditerranéen où les problèmes phytoécologiques ont suscité le plus de travaux. EMBERGER y a notamment mis au point son diagramme et son indice bioclimatique.

Zonation altitudinale de la végétation :

Plusieurs moyens ont été développés pour décrire de manière synthétique cette végétation. L'un d'entre eux consiste à établir une classification en utilisant le concept d'étages bioclimatiques (répartition de la végétation en fonction de l'altitude). ACHHAL *et al.* (1980) et BENABID (1982) définissent ainsi sept étages et leur végétation associée :

### *Etage inframéditerranéen :*

Il occupe la tranche altitudinale allant du niveau de la mer jusqu'à 700-800 m. Les bioclimats fortement océaniques et peu contrastés y sont de types semi-arides, arides et sahariens côtiers. Deux espèces endémiques, *Acacia gummifera* et *Argania spinosa*, prédominent dans le tapis végétal arborescent des formations zonales dominantes.

### *Etage thermoméditerranéen :*

C'est l'étage le plus vaste du Maroc, aussi bien horizontalement que verticalement. Il s'étend du niveau de la mer jusque vers 1000-1400 m. Les bioclimats y sont très variés, allant d'arides à humides, voire perhumides, avec des variantes chaudes à fraîches.

Cette diversité permet le développement de peuplements climaciques très diversifiés. Deux groupes se distinguent : ceux plus humides à dominance de *Quercus suber*, *Q. rotundifolia*, *Q. canariensis*, *Olea europaea* et ceux plus arides qui correspondent aux formations de matorrals ou de forêts présteppiques, où on observe principalement *Tetraclinis articulata*, *Juniperus phoenicea*, *Pistacia atlantica*. Il s'agit également de l'étage dans lequel l'agriculture marocaine s'est le plus développée, notamment aux dépens des peuplements climaciques.

### *Etage mésoméditerranéen :*

Il est compris entre 900 et 1400 m dans le Rif ; entre 1100 et 1500 m dans le Haut Atlas. Les bioclimats correspondants sont compris entre le semi-aride et le perhumide avec des

variantes principalement fraîches. Les gelées commencent à devenir fréquentes à ces altitudes.

Deux ou trois espèces de chênes représentent les essences majeures. Ainsi la série du *Quercus rotundifolia* - *Quercus suber* y est la plus développée du Maroc. Localement, *Quercus canariensis* peut aussi se rencontrer.

#### *Etage méditerranéen supérieur :*

Son amplitude altitudinale est comprise entre 1300 et 1700 m dans le Rif et entre 1400 et 1800 m dans le Moyen Atlas. Il s'agit des mêmes altitudes que celles caractérisant l'étage supraméditerranéen. Les bioclimats y varient entre le semi-aride et le perhumide avec des variantes essentiellement froides.

Cet étage regroupe les formations où dominent les chênaies sclérophylles. Les deux principales séries sont celle du *Quercus rotundifolia* et celle du *Quercus suber*.

#### *Etage supraméditerranéen :*

Ses valeurs altitudinales sont les mêmes que celles caractérisant l'étage méditerranéen supérieur. Il y fait par contre moins aride et la neige et les gelées sont très fréquentes.

Ce sont les chênes caducifoliés comme *Quercus canariensis*, *Q. alpestris* et *Q. pyrenaica* qui y dominent. *Cedrus atlantica*, *Abies maroccana* et *Pinus nigra* peuvent accompagner ces chênes vers le sommet de l'étage.

#### *Etage montagnard méditerranéen :*

Son amplitude altitudinale est comprise entre 1700 et 2300 m dans le Rif et entre 2000 et 2600 m dans le Haut Atlas. Les valeurs du Moyen Atlas sont intermédiaires à celles de ces deux chaînes montagneuses. Les bioclimats vont du subhumide au perhumide, les semi-arides devenant très rares. Les variantes sont froides et très froides.

*Cedrus atlantica* et *Abies maroccana* font partie des quelques espèces forestières majeures encore présentes à ces altitudes.

#### *Etage oro-méditerranéen :*

Ce dernier étage ne se retrouve que sur les plus hauts sommets marocains. Il y fait généralement extrêmement froid. Seules deux séries y sont observées. Celle du *Juniperus thurifera* et celle du *Cedrus atlantica*.

Il ressort de l'étude de BENABID (1982), synthétisant la répartition des différentes séries, que les altitudes limites des étages augmentent en allant du Rif vers le Haut Atlas. La différence entre ces régions atteint rapidement 100 à 200m.

Tout comme le climat, cette situation est amenée à changer. Car, outre le fait que ces modifications climatiques feront varier ces différents étages, il faut signaler que la plupart des forêts au Maghreb sont menacées à un degré plus ou moins important ; certaines espèces, comme *Cedrus atlantica* plus particulièrement.

## **Le Cèdre**

### ***Description générale du genre Cedrus TREW***

Le genre *Cedrus* (Pinaceae) est classé parmi les plantes à graines (Spermatophytes) et plus précisément les plantes à ovules nus (Gymnospermes). Il porte des cônes constitués d'écaillés disposées en spirale ; les cônes mâles et femelles sont séparés, mais portés par le même spécimen (plante monoïque). Les écaillés des cônes mâles et femelles portent respectivement 2 sacs polliniques à leur face inférieure et 2 ovules à la face supérieure. Les

feuilles du genre, persistantes (1/3 des aiguilles tombent tous les ans), sont en forme d'aiguilles et disposées en rosettes. *Cedrus* se distingue également de beaucoup d'autres genres de *Pinaceae* par la présence de deux sortes de rameaux, des courts (mésoblastes) portés par des plus longs (auxiblastes). Enfin, il est un des seuls à posséder des cônes qui se désarticulent à maturité.

Les différentes parties des cèdres contiennent de la résine, ils sont donc qualifiés de résineux. 4 espèces font partie du genre *Cedrus* :

- le cèdre de l'Atlas ou *Cedrus atlantica* Manetti
- le cèdre du Liban ou *Cedrus libani* A. Rich.
- le cèdre de Chypre ou *Cedrus brevifolia* Henry
- le cèdre de l'Himalaya ou *Cedrus deodara* G. Don

La première espèce fait l'objet de ce travail. Elle est endémique des montagnes nord-africaines. La seconde est présente en Asie mineure, au Liban et en Turquie. La répartition de *Cedrus brevifolia* est plus confidentielle. En effet, elle ne couvre que quelques dizaines d'hectares dans l'île de Chypre. Enfin, *Cedrus deodara* est la plus répandue ; elle peuple une partie de l'Inde, de l'Afghanistan et du Népal (TOTH, 2005). Les caractères biologiques de ces différentes espèces sont repris au tableau 1.

Tableau 1: caractères biologiques des quatres espèces de Cèdre (FARJON, 1990 et TOHT, 2005)

Espèces	<i>C. atlantica</i>	<i>C. libani</i>	<i>C. brevifolia</i>	<i>C. deodara</i>
Taille des aiguilles (cm.)	1 à 2,5	1 à 3,5	0,5 à 1,5	2 à 6
Cônes - longueur - diamètres (cm)	5 à 8 3 à 5	8 à 12 3 à 6	5 à 10 3 à 6	7 à 13 5 à 9
Graine - longueur (cm.) - envergure (cm.)	0,8 à 1,3 2,5 à 3,5	1 à 1,4 3,5 à 4	0,8 à 1,4 3 à 4	1 à 1,5 3,5 à 4,5
Epoque de polinisation	mi - septembre	mi - septembre	début septembre	debut novembre
Durée de maturité	2 ans	2 ans	2 ans	1 an

Dans la suite du travail, seule l'espèce *Cedrus atlantica* sera étudiée. Si le terme « Cèdre » est employé seul, c'est à cette espèce qu'il se rapporte.

## **Cedrus atlantica**

### ***Caractères généraux***

*Cedrus atlantica*, Arz el Atlas en Arabe ou Idil en berbère, est l'une des espèces économiquement et écologiquement les plus importantes de la montagne méditerranéenne. Le cèdre de l'Atlas peut être de grande taille, jusqu'à dépasser les 40 m de hauteur. La moyenne se situe vers 25-30 m. Dans de bonnes conditions, il est capable de vivre plusieurs siècles. Des spécimens presque millénaires sont renseignés au Maroc.

Le plaidoyer de Michel TARRIER et de Jean DELACRE (2006) en faveur des cédraies marocaines cerne bien les causes de cette importance : « Par la biomasse qu'elle engendre, pour sa fonction protectrice du sol et parce qu'elle est la formation essentielle s'inscrivant dans le rôle salubre et légitime de « ceinture verte » de l'Atlas, ultime rempart contre la désertification menaçante, pour être un incommensurable réservoir génétique où prospère une riche biodiversité, pour l'outil fidèle que son ambiance forestière représente pour les collectivités locales et les populations rurales (vocation sylvo-pastorale, bois de chauffe, bois d'œuvre, plantes médicinales, loisirs) et pourquoi pas pour la dimension poétique, esthétique et culturelle qu'elle induit, la cédraie joue un rôle considérable à l'échelle nationale et méditerranéenne. »



## Cycle de reproduction

Dans des conditions favorables, les cônes mâles apparaissent sur des arbres de 15-16 ans et les cônes femelles sur des arbres de 17-18 ans. Si les conditions sont plus difficiles, ils peuvent se développer seulement sur des spécimens âgés de 30-32 ans.

Le cycle de reproduction, de la production des graines jusqu'à leur dissémination, s'étale sur 3 années (TILL, 1985). Il peut se résumer à :

- Année 1 : apparition des cônes, « floraison » et pollinisation.
- Année 2 : fécondation des ovules par les gamètes mâles et croissance des cônes.
- Année 3 : Maturation des cônes et leur désarticulation --> dissémination des graines.

La majorité des graines est dispersée dans les 2 à 3 semaines qui suivent le déclenchement du processus. La plus grosse partie tombe aux abords immédiats de l'arbre, quelques graines vont jusqu'à 50 m et, dans certaines conditions favorables, certaines dépassent les 100 m.

Pour que le gel ne les endommage pas trop, il ne faut pas que la température descende sous les -8 à -10°C. Les conditions de germination requises sont : la maturité physiologique, la lumière, la présence d'eau sans excès, l'oxygène et une certaine température. Ensuite, la vitesse de croissance des racines de la plantule est l'un des facteurs fondamentaux de la survie des semis.

## Ecologie

Dans leur aire naturelle, les cédraies associées à des feuillus comme les chênes, plus ouvertes que les cédraies exclusives, représentent des écosystèmes extrêmement variés. Elles abritent une faune et une flore abondantes.

La richesse floristique des cédraies est estimée à un millier d'espèces dont environ 10% d'arbres, 15% d'arbustes et arbrisseaux et 75% de plantes herbacées annuelles ou pérennes (M'HIRIT *et al.* 1999).

Parmi les arbres les plus fréquemment rencontrés figurent :

- des chênes: *Quercus rotundifolia* (Chêne vert) ; *Quercus suber* (Chêne-liège) ; *Quercus faginea* (Chêne zeen),
- des pins: *Pinus halepensis* (Pin d'Alep) ; *Pinus pinaster* (Pin maritime);
- des genévriers: *Juniperus thurifera* (Genévrier thurifère) ; *Juniperus oxycedrus* (Genévrier oxycèdre).

Les autres arbres directement associés à *Cedrus atlantica* sont des frênes, des sapins, des érables, l'if commun.

Plusieurs champignons, lichens et mousses apprécient aussi l'ambiance humide des cédraies. Certaines espèces sont exclusives du cèdre. Ces champignons peuvent être fort utiles à l'arbre ; certains ectomycorhiziens protègent ses racines par différentes voies (barrière mécanique, production de substances antibiotiques,...) (TOTH, 2005).

La faune est également très variée. Voici un petit aperçu des animaux que la cédraie abrite :

- 37 mammifères, avec entre autres le renard roux, le magot de Barbarie, le sanglier, le cerf élaphe, le mouflon, la genette, la mangouste ichneumon.
- 142 oiseaux, aussi bien des sédentaires : l'aigle botté, le milan noir, le coucou gris, la chouette hulotte, des pics, des mésanges que des migrateurs pour qui le Maroc représente une importante voie de passage entre l'Europe et l'Afrique. Les passereaux y sont les mieux représentés.
- 33 amphibiens et reptiles, parmi lesquels la salamandre d'Afrique du Nord, des crapauds, des grenouilles, une tortue d'eau douce, des lézards, un orvet, des vipères et des couleuvres.
- Quantité d'invertébrés : ils jouent un rôle très important dans l'écosystème. Trois

classes d'insectes se distinguent :

- 1.Des phyllophages qui se nourrissent des aiguilles et de la sève du cèdre : des lépidoptères (chenilles processionnaires, Bombyx), des coléoptères des hémiptères (cochenilles), et des homoptères (pucerons) se rencontrent parmi cette classe.
- 2.Des xylophages dont des coléoptères (scolytes, longicornes, ...) qui constituent l'essentiel des insectes attaquant le bois du cèdre.
- 3.Enfin certains insectes, des lépidoptères (pyrales), et des diptères principalement, apprécient les cônes et graines de l'arbre (MOUNA, 1994).

S'ajoutent à ces catégories tous les invertébrés qui jouent un rôle dans la décomposition de la litière.

Les cédraies en bonne forme peuvent donc constituer des réservoirs génétiques de grand intérêt, que ce soit du point de vue de la biodiversité (qualitatif) que de celui des populations (quantitatif). Malheureusement, la disparition de plusieurs espèces dans différents sites marocains indique que ces forêts se dégradent, principalement par action anthropique (TARRIER *et al.* 2006).

#### Ennemis de *Cedrus atlantica*

Plusieurs facteurs font pression sur les cédraies. Les principaux sont les facteurs climatiques, écologiques et anthropiques. Ses ennemis naturels sont quelques-uns des insectes, mammifères et oiseaux cités plus haut, des champignons et des végétaux parasites. Mais c'est sans conteste l'homme qui lui cause le plus de dégâts. Il pratique dans les cédraies de manière trop intensive la coupe, le défrichement et le parcours, c'est-à-dire la libre circulation des troupeaux, principalement des ovins et des caprins (EL YOUSFI, 1994).

#### Limites climatiques et altitudinales ; conditions édaphiques

Le rattachement des cédraies à différents étages de végétation a déjà été introduit dans le chapitre sur la végétation marocaine. ACHHAL *et al.* (1980) et BENABID (1982) l'associaient à l'horizon supérieur de l'étage méditerranéen, au montagnard méditerranéen et à l'oroméditerranéen. Cela correspond à des altitudes comprises entre plus ou moins 1300 et 2600 m. Au-delà de cette dernière, il est généralement remplacé par le Génévrier thurifère.

Le Cèdre de l'Atlas s'encarterait donc dans les bioclimats subhumides à perhumides froids à très froids. Il connaîtrait ainsi des précipitations allant de 500 à 2000 mm d'eau par an et des températures minimales du mois le plus froid pouvant se situer entre -1 et -8°C (BENABID, 1994).

Cet arbre rustique semble indifférent à la nature lithologique du sol et à ses propriétés chimiques. Il peuple des substrats et des sols variés tels que des basaltes, des dolérites, des marnes, des dolomies, des calcaires, des schistes ou encore des grès.

En fait l'aspect physique du sol semble beaucoup plus important dans le développement de l'arbre. Il conditionnerait en partie l'accès aux ressources hydriques (Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte contre la désertification - comm.pers.). La préférence de *Cedrus atlantica* va aux sols plutôt meubles (éboulis, cailloutis) ou développés sur roches fissurées (système racinaire pivotant et puissant).

L'amplitude écologique de *Cedrus atlantica* est donc relativement large. Cette plasticité fait que l'arbre apparaît comme très protéiforme et est à la base d'une assez grande variation parmi les différents peuplements. Cela a amené plusieurs auteurs à distinguer des cédraies de basse, moyenne et haute montagne et des cédraies océaniques et continentales (M'HIRIT *et al.* 1999).

Les facultés d'adaptation de cet arbre devraient donc en faire une espèce à prendre en considération pour le reboisement des forêts.

## Historique

### Généralités et outils

La présence de *Cedrus atlantica* en Afrique du nord n'est pas récente. Il y est certainement établi depuis le Pléistocène moyen, voire inférieur. Cependant sa répartition ne fut pas toujours celle que nous connaissons actuellement.

D'une manière générale, il semble que son ancienne aire naturelle, plus ou moins étendue en fonction des différents paléoclimats, montrait des frontières plus orientales (en Tunisie) et plus méridionales (dans le Haut Atlas) que les actuelles. En plus de cette migration longitudinale et latitudinale, on constate une variation altitudinale de l'arbre au cours du temps.

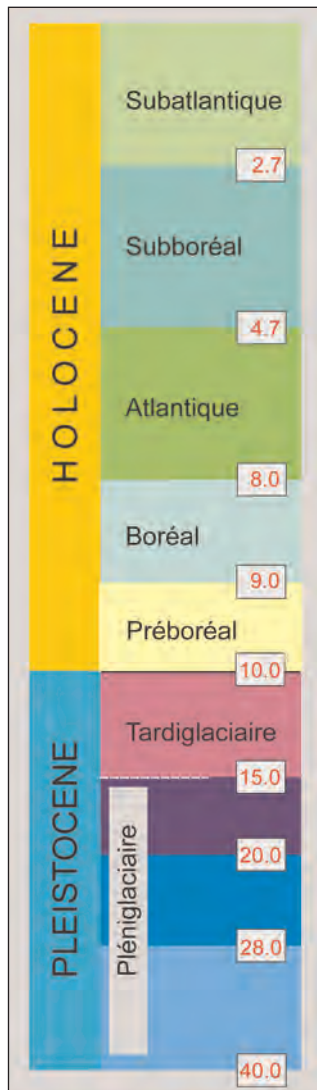


Fig.4: échelle du temps  
(âges = x 1000 ans B.P.)

- Pléniglaciaire moyen et supérieur (40.000 à 15.000 B.P.)

Des pollens retrouvés dans plusieurs endroits de Tunisie, en Kroumirie (BEN TIBA et REILLE, 1982, STAMBOULI-ESSASI, 2002), ainsi que dans des carottes marines du Golfe de Gabès (BRUN, 1979 et 1989) et au Maroc (AGWU et BEUG, 1982) attestent que *Cedrus atlantica* était déjà bien établi en Afrique du Nord depuis le début du Pléniglaciaire moyen. Par ailleurs, COUVERT et ROCHE (1978) ont trouvé du charbon de bois de Cèdre dans la grotte de Taforalt, au milieu des Monts des Beni Snassen. Ils le datent de façon imprécise entre 35.000 et 15.000 B.P.

Différents outils, comme les restes fossiles et la modélisation, permettent d'investiguer la paléobiogéographie du Cèdre. Le plus utilisé d'entre eux est l'analyse pollinique de séquences fossiles. Bien que le Maghreb ne soit que partiellement couvert par des études palynologiques, un résumé de celles déjà réalisées offre une bonne idée de l'évolution qu'a pu connaître l'aire de répartition du cèdre, au moins durant l'Holocène.

### Historique du cèdre

De manière chronologique, voici comment *Cedrus atlantica* s'est propagé en Afrique du Nord.

L'échelle de temps est celle de la figure 4 ; l'évolution de la distribution du Cèdre au Maghreb est représentée à la figure 5. Il est important de faire deux remarques sur cet historique: -l'analyse pollinique n'étant intéressante que pour certains types de sédiments (lacustres, palustres), les données existantes concernent seulement une faible partie du territoire et offrent donc toujours une image plutôt locale de la flore, -la précision temporelle est plus ou moins grande selon les auteurs et le matériel disponible.

### Pléistocène supérieur

Seules les 30.000 dernières années du Pléistocène supérieur, c'est-à-dire de 40.000 à environ 10.300 B.P., offrent quelques données permettant de reconstruire partiellement la distribution passée du cèdre.

Ces différentes données tendent à montrer que le Cèdre était présent en Tunisie et au Maroc depuis au moins 40.000 ans B.P. et qu'il a atteint son aire optimale vers 24.000 B.P. Cela indiquerait, par comparaison à la période actuelle, que le climat qui régnait sur le Maghreb à cette époque était de type froid évoluant vers l'aride en altitude. C'est ainsi que les régions montagneuses de Tunisie ont pu constituer un refuge pour le Cèdre durant cette période glaciaire, les 5.000 dernières années du Pléniglaciaire supérieur (d'environ 20.000 à 15.000 B.P.) ayant certainement dû voir les conditions climatiques favorables au Cèdre réunies à des altitudes moins élevées que celles occupées actuellement.

- Tardiglaciaire (15.000 à 10.300 B.P.)

Au Tardiglaciaire, l'analyse des pourcentages polliniques dans les séquences fossiles indique que le Cèdre est toujours bien implanté en Tunisie où les conditions climatiques lui sont toujours favorables (STAMBOULI-ESSASI, 2002).

On peut le voir dominer dans certaines régions d'Algérie, comme dans le Massif de l'Akfadou en Grande Kabylie, où le diagramme de la Châtaigneraie le renseigne depuis au moins 10.140 B.P. (SALAMANI, 1993)

DAMBLON (1989) estime qu'au Maroc, il est presque certain qu'avant le début de l'Holocène, *Cedrus atlantica* était réfugié dans les montagnes du Haut Atlas, au Jbel Ayachi et au Jbel Masker. Il appuie cette théorie sur les pollens de *Cedrus* retrouvés dans des dépôts plus anciens que 8.500 B.P. à Ksabi, dans la vallée de la Moulouya.

Holocène

- Préboréal (10.300 à 9.000 B.P.)

Dès le début de l'Holocène, la configuration climatique, plus chaude, devient de plus en plus favorable au Chêne et pousse le Cèdre à se développer à de plus hautes altitudes. Cela a pour conséquence la disparition progressive du Cèdre en Tunisie où la majorité des sommets culmine à moins de 1500 m.

Le même phénomène se produit dans les montagnes algériennes, mais *Cedrus* reste cependant fort important dans le paysage (CHEDDADI, 2004). PONS *et al.* (1958) signalent des pollens qui apparaissent sporadiquement depuis 10.000 ans dans les montagnes du Hoggar. Les faibles pourcentages polliniques qu'ils décrivent constituent probablement des apports lointains.

La présence de Cèdre au Maroc ne peut être confirmée par aucun enregistrement pollinique daté du Préboréal.

- Boréal (9.000 à 8.000 B.P.)

Le climat est de moins en moins favorable à *Cedrus* aux basses altitudes qu'offre la Tunisie. De plus, il est probablement en concurrence avec le Chêne dans la tranche altitudinale où il persiste.

Le phénomène est le même en Algérie : l'arbre doit certainement se réfugier vers les plus hautes altitudes. Ainsi de manière générale, la courbe pollinique du chêne augmente dans le diagramme de la Châtaigneraie (Grande Kabylie).

Par contre le Cèdre semble bien se porter dans divers endroits du Maroc. REILLE (1977) pense qu'il est bien représenté dans le Rif, où il connaît son optimum à Daya Abartète. Il émet même l'hypothèse d'une installation dans cette région antérieure au Boréal. Mais cela reste à vérifier, car la chronologie des sites étudiés par REILLE n'est pas toujours établie par datations absolues. Si elle l'est, ce n'est que par une ou deux datations. Au Boréal, les dépôts fossiles de Ksabi (vallée de la Moulouya) assurent pour BALLOUCHE et DAMBLON (1988) la présence du Cèdre dans le Haut Atlas.



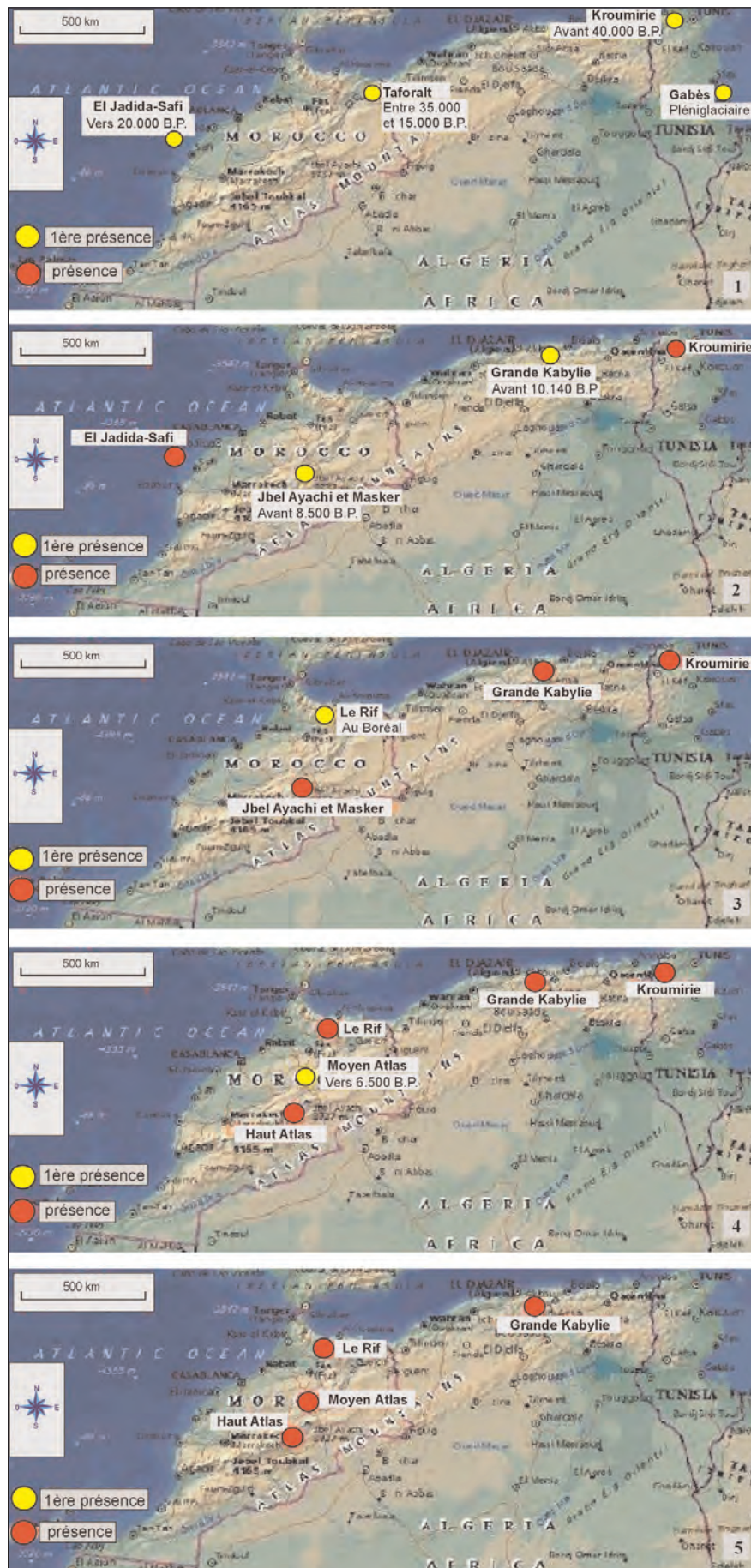


Figure 5: sites avec pollen de Cèdre aux périodes suivantes:

1. Pléniglaciaire moyen & supérieur - 2. Tardiglaciaire - 3. Boréal - 4. Atlantique - 5. Subboréal

#### - Atlantique (8.000 à 4.700 B.P.)

L'atlantique constitue la période d'optimum climatique pour les chênaies. Il fait alors chaud et humide. Quelques pulsations sèches sont toutefois enregistrées. Des pics de cèdres peuvent alors apparaître.

L'Atlantique constitue la dernière période où le Cèdre est encore présent dans les diagrammes polliniques tunisiens. Sa disparition de la région n'est pas datée avec précision. Les diverses traces rencontrées postérieurement à l'Atlantique sont trop peu importantes pour venir d'une cédraie locale et doivent être le fait d'apports lointains.

Les dernières traces de Cèdre dans le diagramme de la Châtaigneraie remontent au début de l'Atlantique, vers 7960 B.P. D'après SALAMANI (1993) les cédraies algériennes se seraient ensuite réfugiées en altitude, vers les sommets du Djurdjura.

Au Maroc, l'enregistrement pollinique décrit par REILLE (1977) le renseigne toujours dans le Rif. Il y serait fortement présent. Les données pour le Haut Atlas ne sont pas datées précisément à l'Atlantique, mais la présence de cédraies est possible. Il apparaît dans le diagramme de Tigalmamine (Moyen Atlas) vers 6.500 B.P. (LAMB et al. 1995). Le pourcentage de pollen de *Cedrus atlantica* n'y dépasse pas les 5% au cours de l'Atlantique.

#### - Subboréal (4.700 à 2.700 B.P.)

Au Subboréal, le climat est de nouveau favorable au Cèdre. Il connaît une nouvelle phase de développement et sa répartition se rapproche de plus en plus de celle que nous connaissons aujourd'hui.

Il n'y a plus de traces locales de l'arbre en Tunisie. Il disparaît ainsi de l'est du Maghreb. DAMBLON (1989) explique cette disparition par l'installation du système de circulation atmosphérique actuel, avec un apport d'humidité atlantique.

En Algérie, il semble que les cédraies soient restées cantonnées aux hautes altitudes.

Au Maroc, *Cedrus atlantica* prend de plus en plus d'importance dans la flore. Il connaît une nouvelle période d'extension au nord, dans le Rif. Le diagramme de Tigalmamine indique qu'il devient une essence abondante dans le Moyen Atlas dès le début du Subboréal (CHEDDADI et al., 1998). C'est dans cette région du Maroc que depuis environ 3.000 ans B.P. on rencontre les pourcentages de *Cedrus* les plus importants. Par contre, dans le Haut Atlas, probablement plus aride, sa présence est moins marquée et le paysage semble être dominé principalement par des herbacées.

#### - Subatlantique (2.700 B.P. à l'actuel)

La distribution au Subatlantique est plus ou moins la même qu'au Subboréal, à cela près que la pression anthropique se fait de plus en plus ressentir. L'homme coupe les cédraies pour utiliser le bois et mettre en cultures les terrains déboisés. Il pratique le pâturage. Certaines régressions du Cèdre dans les diagrammes polliniques sont interprétées comme correspondant aux phases d'occupations phénicienne, romaine, arabe.

Aujourd'hui, les forêts ressentent toujours fortement cette pression humaine, mais il est heureux de constater que les autorités actuelles semblent plus concernées par ce problème que dans le passé. Espérons qu'elles puissent concilier les exigences humaines avec la préservation de ce milieu si riche que constitue la cédraie.

### *Situation géographique actuelle*

#### Aire naturelle

Comme le chapitre précédent permet de le supposer, *Cedrus atlantica* est endémique de certaines montagnes marocaines et algériennes.

Il est toutefois impossible de trouver, dans la littérature existante, une carte de l'aire



naturelle actuelle de *Cedrus atlantica* suffisamment définie (géoréférencement, échelle,...) pour pouvoir être traitée par les modèles IBM et CARAIB.

S'il existe bien des cartes de répartition, comme celle de EMBERGER (1939), QUEZEL (1980), FARJON (1990), M'HIRIT (1994), elles manquent cependant toutes de précision.

- Maroc

Une partie de ce travail a été consacrée à la réalisation d'une carte numérisable de la distribution du Cèdre de l'Atlas au Maroc. Le choix de ce pays est justifié par le fait que c'est sur ce territoire que le Cèdre présente la plus grande extension.

Une série de cartes de types de peuplements au 1/25.000<sup>ème</sup> conservées par le Ministère marocain des Eaux et Forêts à Rabat constituent le matériel de base pour sa réalisation. Les plus anciennes de ces cartes ont maximum trente ans. Elles ont été dressées dans le cadre d'études d'aménagement des forêts marocaines.

Grâce à l'aide de Monsieur BENZYANE et de son service (division de l'aménagement forestier), on a pu extraire de ces cartes les différentes coordonnées Lambert des cédraies marocaines. Ces coordonnées Lambert ont ensuite été converties en longitudes et latitudes grâce au logiciel de conversion de données « CONVERS ». Les paramètres nécessaires à cette opération sont repris dans le tableau 2 (EL FETTAH, 2003).

Tableau 2: paramètres nécessaires à la conversion de la projection Lambert

Parallèle 1	Parallèle 2	Longitude origine	Parallèle origine $\phi$	Constante X0 (m)	Constante Y0 (m)
31.05°	35.55°	-5.24°	37 g	500000	300000

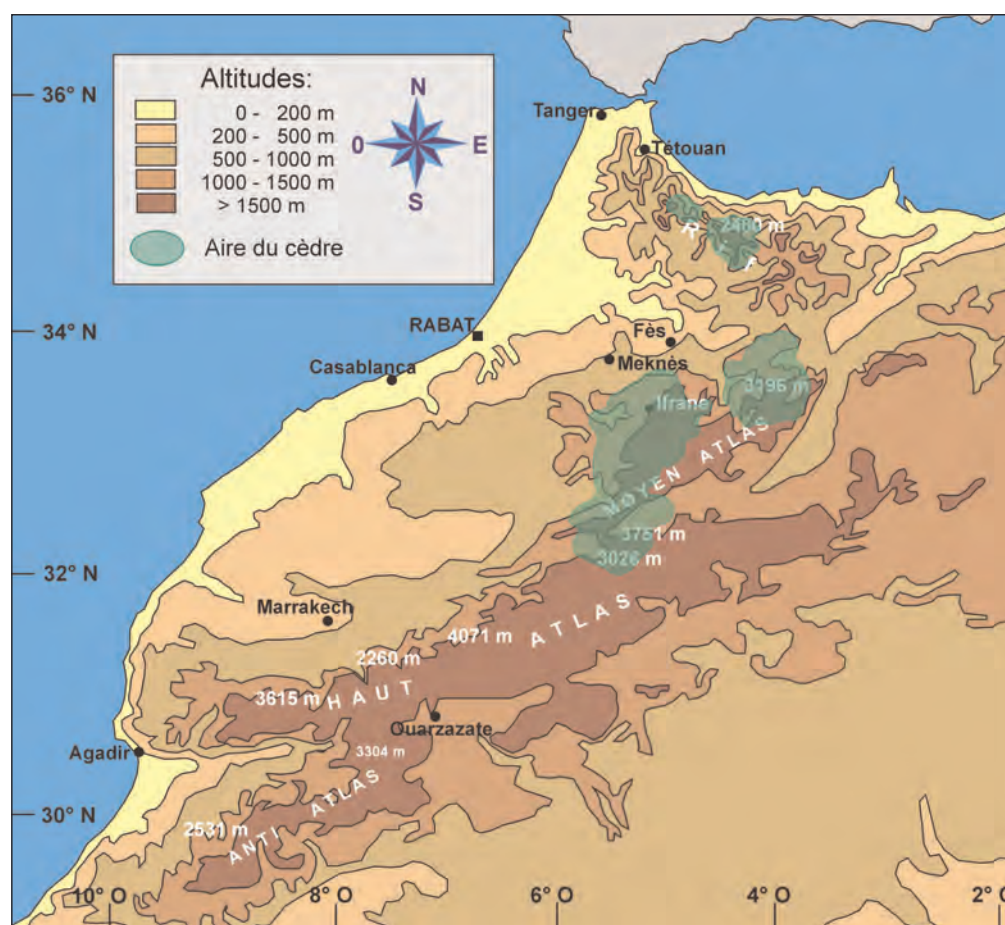


Figure 6: aire de *Cedrus atlantica* au Maroc

Toutes ces données sont regroupées dans un tableau absences/présences dont les carrés font 0,166° de côté. La superposition de ces absences/présences sur une carte de relief et leur traitement par un logiciel de manipulation de données géographiques comme "GMT" permet alors de dessiner une nouvelle carte de distribution de l'essence *Cedrus atlantica* au Maroc. Cette carte permettra de définir les paramètres de tolérance climatique du Cèdre de l'Atlas nécessaires aux simulations.

La figure 6 représente la synthèse des opérations sus-mentionnées.

L'ensemble des cédraies couvre une aire de plus de 130.000 hectares. La majorité se trouve dans le Moyen Atlas ; le reste se rencontre plus au nord dans le Rif et plus au sud dans le Haut Atlas.

#### - Algérie

*Cedrus atlantica* est également endémique des montagnes de l'Algérie. Les cédraies se rencontrent au centre nord et à l'est du pays. Elles sont morcelées en plusieurs îlots plus ou moins importants qui couvrent une superficie d'environ 27.000 ha (BENABID, 1994).

La carte que ROCHE (2006) utilise (Figure 7) donne une bonne idée de la localisation de ces îlots d'est en ouest.

#### Autres implantations

*Cedrus atlantica* se rencontre aussi dans d'autres pays où il a été implanté par l'homme au cours des derniers siècles.

#### - France

Son introduction remonte à 1862, sur les flancs du Mont Ventoux. Depuis lors, la France est en tête des pays possédant des cédraies en dehors de l'aire naturelle de l'espèce.

Une des raisons de son importance est son utilisation pour reboiser les grands espaces forestiers laissés libres par les froids intenses, les grands incendies ou encore les attaques d'insectes ravageurs de ces dernières années.

Aujourd'hui, *Cedrus atlantica* est présent plus ou moins abondamment dans 25 départements de la partie méridionale du pays (TOTH, 2005). Voici les six départements de France méridionale où il est le mieux représenté, en remontant vers le Nord : l'Aude (n°11), l'Hérault (n°34), le Gard (n°30), le Vaucluse (n°84), la Drôme (n°26) et l'Ardèche (n°07).

Ce sont donc principalement les régions du Languedoc-Roussillon, de Rhône-Alpes et de Provence-Alpes-Côte d'Azur qui l'accueillent le plus favorablement.

*Cedrus atlantica* couvre environ 20.000 ha de forêts avec un taux de boisement de plus ou moins 1.000 ha/an. La figure 8 reprend la carte dressée pour cette essence par l'inventaire forestier national en 2001.

Sa progression ne devrait pas s'arrêter là, car son aire potentielle serait de 200 000 ha (FABRE, 1994). Les forestiers spécialisés estiment qu'il présente de fortes potentialités pour la reconstruction de la forêt méditerranéenne française.

#### - Italie

Le Cèdre de l'Atlas est également utilisé dans ce pays comme espèce de reboisement. Son introduction remonte au 19ème siècle, période où il fut planté en Toscane. Depuis, les cèdres peuplent sur près de 1.000 ha plusieurs régions du sud et du centre de l'Italie (MICHELE *et al.*, 2001) : la Sicile, la Calabre, la Sardaigne, la Molise, les Abruzzes.

ANDREA et ROBERTO (1994), tout comme PANDOLFI *et al.* (1996), renseignent aussi le Cèdre au centre de l'Italie, les premiers au sud de la montagne Pratomagno (Toscane, entre Florence et Arezzo), les seconds dans la région de Marche.



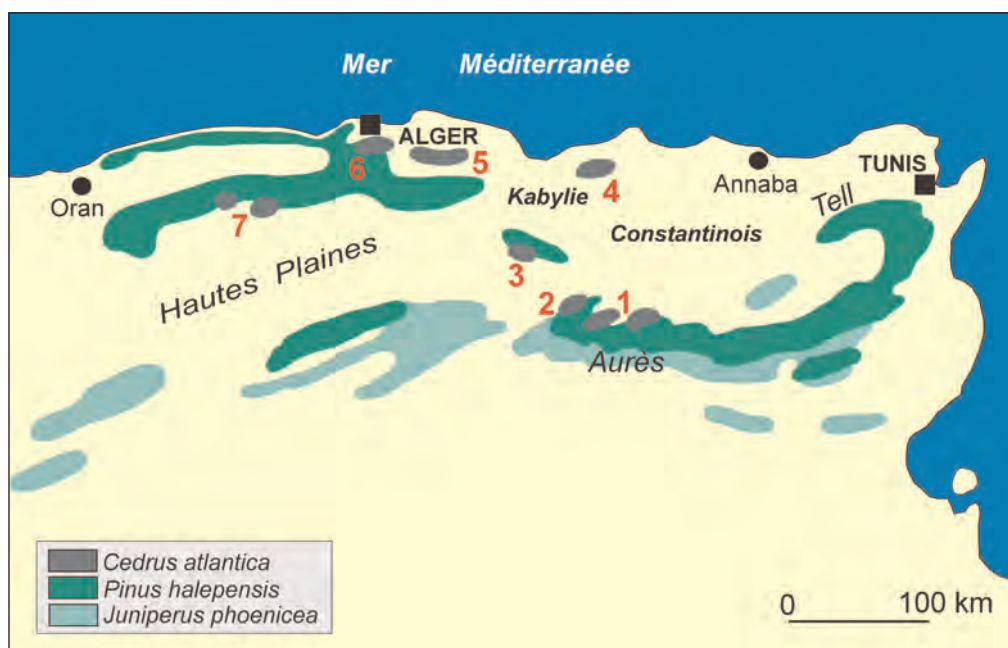


Fig.7: localisation de *Cedrus atlantica* en Algérie (E.Roche; modifié)

1. Massif de l'Aurès; 2. Monts de Belesma; 3. Monts de Hodna; 4. Jbel Babor
5. Massif de Djurdjura; 6. Monts de Blida; 7. Massif de l'Ouarsenis.

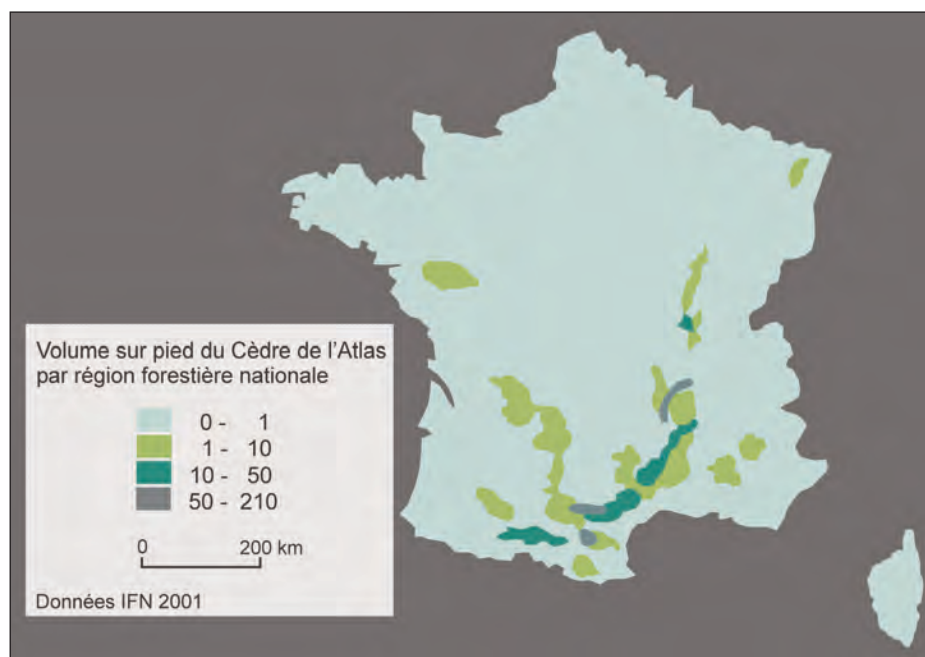


Figure 8: volume sur pied (en m<sup>3</sup>) du Cèdre de l'Atlas en France

#### - Bulgarie

Les premiers cèdres de Bulgarie y ont été plantés en 1876. DELKOV et GROZEV (1994) précisent qu'on peut les trouver dans divers endroits du pays, comme : dans la région de Varna le long de la Mer Noire, au centre du pays dans le Ayazmo park, près de la ville de Stara Zagora dans les Monts Balkans, entre Sofia et Sandanski dans les Monts Rhodopes.

#### - Hongrie

CSABA, M. (1994) relate la bonne tenue de *Cedrus atlantica* en Hongrie, avec pour exemple des stations situées dans les montagnes au nord-est du Danube.

## Divers autres

LASRAM (1994) indique que *Cedrus atlantica* a été introduit en Russie comme espèce de reboisement, sans donner plus de précisions sur son implantation.

TOTH (2005) parle de l'introduction du cèdre au Portugal en 1935, mais il n'indique pas si ces peuplements ont perduré.

M'HIRIT (1994) signale son introduction dans quelques états des Etats Unis : Pennsylvanie, New York, Côte pacifique.

Il cite également des reboisements sur grande échelle en Crimée (Ukraine) et dans le Caucase.

## Palynologie

### *Apports de la palynologie*

Le point « Historique » précise que la palynologie constitue l'outil de référence dans l'investigation de la paléobiogéographie du Cèdre. Cela est notamment dû aux propriétés de conservation exemplaire des grains de pollen. En effet, à partir de données palynologiques, il est possible d'obtenir une carte de l'aire de distribution de la végétation fort proche de sa distribution réelle. Cette constatation est valable aussi bien pour le passé que pour le présent.

Comme une carte de distribution réelle actuelle de *Cedrus atlantica* (cfr. Maroc) a été établie pour ce travail, il n'est plus indispensable d'en dessiner une autre à partir des données palynologiques récentes. Cependant la comparaison de ces deux cartes pourrait quand même se révéler instructive. Elle validerait l'usage de données palynologiques dans l'optique d'une étude plus précise sur l'histoire du cèdre.

Lors de la réalisation d'une carte à partir de données palynologiques, quatre types d'erreurs sont inévitables :

1. bien que les grains de pollens se conservent extrêmement bien, il arrive que certains ne fossilisent pas et soient absents des sédiments. Des lacunes sédimentaires ne sont pas rares,
2. les territoires couverts par les études palynologiques ne sont pas toujours suffisamment importants pour englober la totalité de l'aire de répartition,
3. le mode de dispersion des pollens est source d'erreur. Ils sont transportés par le vent et peuvent donc se retrouver à plusieurs dizaines de kilomètres de leur zone d'émission. L'exemple de MAGRI et *al.* (2002) montrant des pollens de *Cedrus atlantica* originaires d'Afrique du Nord transportés jusqu'en Italie illustre bien ce biais. Dans ce cas, l'aire de répartition sera supérieure à l'aire réelle. Cependant en établissant des seuils nous pouvons distinguer la présence potentielle du simple transport à longue distance,
4. des erreurs lors du traitement des pollens sont inévitables et peuvent affecter légèrement les pourcentages de présence obtenus.

Limiter ces erreurs n'est pas toujours évident, c'est même impossible dans le cas de lacunes. Par contre, le nombre d'échantillons étudiés assure une couverture du territoire suffisamment importante. Les pollens étant dispersés par le vent sur des distances plus ou moins éloignées, l'aire obtenue par les données palynologiques sera donc logiquement trop étendue par rapport à la réalité. La confrontation des cartes de distribution et celle des données palynologiques doit permettre de définir à partir de quel seuil les pollens sont considérés comme autochtones.

### *Echantillons*

#### *Description du matériel*

Le matériel étudié est constitué de trois jeux d'échantillons palynologiques actuels

fournis par l'Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM) (CHEDDADI, comm.pers., 2006). Des comptages ont déjà été effectués sur la totalité de deux d'entre eux. Le premier jeu qui contient 284 échantillons a été analysé par A. SAADI. Les comptages du second, riche de 219 échantillons, ont été effectués par A. LAARBI.

Le troisième lot d'échantillons est constitué de 19 mousses et d'un sédiment superficiel. Ces échantillons ont été traités à l'Université de Liège. K. HUANG de l'ISEM en a déjà analysé 11 (Informations : v. Tableau 3).

Tableau 3: informations sur les lots d'échantillons

Lot d'échantillons	1. Saadi	2. Laarbi	3. Huang
Nombre d'échantillons	284	219	11
Nombre d'échantillons avec <i>Cedrus atlantica</i>	99	147	9
Nombre minimal de pollens comptés	200	200	200
Exceptions	n°233 et n°273 avec respectivement 171 et 93 pollens comptés	aucunes	N°MS08 et n°MS11 avec respectivement 106 et 192 pollens comptés
Nombre de taxons	301 prévus. Plusieurs sont inutilisés	134	58
Intitulé du taxon contenant <i>Cedrus atlantica</i>	« 2645 »	CEDR	Cedrus

#### *Provenance*

Tous les échantillons ont été récoltés au Maroc. Les zones du Rif et de l'Atlas sont les mieux couvertes. Les points verts de la figure 9 indiquent l'emplacement des échantillons de SAADI. Ceux de LAARBI sont représentés par les points rouges et le dernier lot par les points bleus.

#### *Traitements*

##### *- Traitement à l'HF*

Les échantillons récoltés contiennent toujours une fraction plus ou moins importante de silicates provenant soit du substrat soit de la déflation éolienne. Pour les éliminer, le sédiment est traité préalablement à l'acide fluorhydrique (GIRALDO, Comm. Pers.).

##### *- Acétolyse*

Une fois que les silicates sont éliminés, il convient d'éliminer la matière organique gênante grâce à une acétolyse (Méthode ERDTMAN, 1960) ; ensuite, on enlève la partie la plus fine en filtrant avec un tamis à 20  $\mu$ m.

##### *- Montage*

Une fois ce traitement réalisé, quelques gouttes de la préparation sont mélangées à de l'HEC (mélange de cellulose hydroxyéthilique, d'alcool et d'eau distillée) sur un couvre-objet afin d'assurer une meilleure dispersion des pollens. Après séchage à l'étuve, le couvre-objet est collé à la lame au moyen d'une colle naturelle.

## - Comptages

La méthode de comptage employée est la même pour chaque lot d'échantillons. Elle consiste à identifier et compter tous les taxons présents dans l'échantillon monté entre lame et lamelle. L'abondance de chacun de ces taxons est calculée en divisant le nombre de pollens des taxons par le nombre total de pollens comptabilisés. Les pourcentages obtenus ne sont fiables que si un minimum de pollens est déterminé pour chaque lame. L'expérience montre que le comptage de 200 pollens permet généralement d'obtenir des résultats représentatifs.

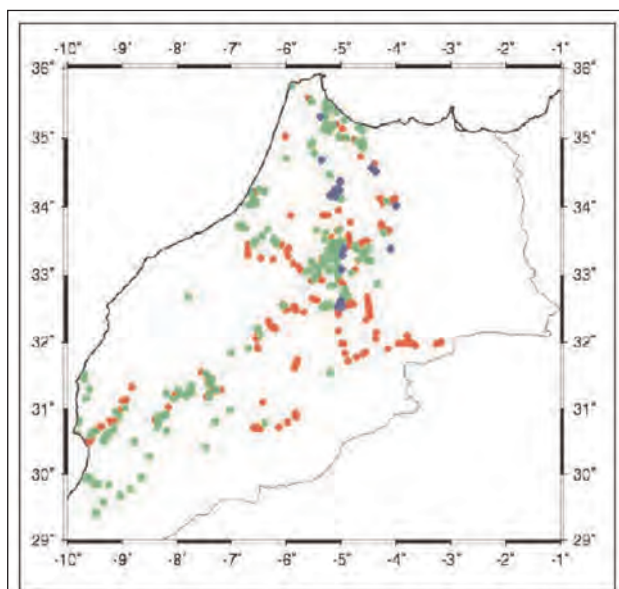


Figure 9 : emplacements des échantillons palynologiques (CHEDDADI, 2006)

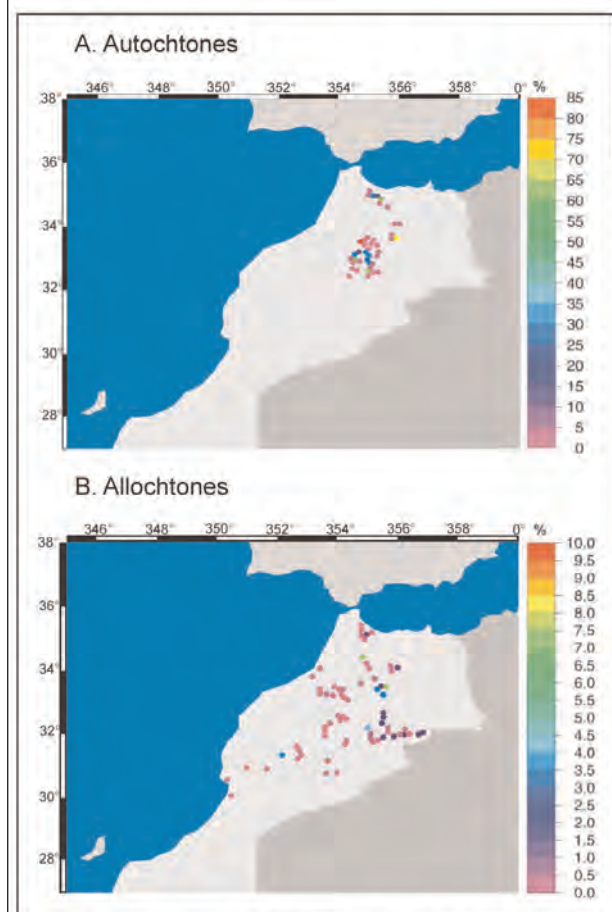


Figure 10: comparaison du % de pollen de *Cedrus atlantica* entre les échantillons autochtones et allochtones

## Résultats

Sur l'ensemble des résultats des différents comptages, le pourcentage de *Cedrus atlantica* atteint un maximum de 81,85% dans les analyses effectuées par SAADI (échantillon n°141), il est de 72,12% dans ceux analysés par LAARBI (échantillon n°121) et de 50,58% dans ceux de Huang (échantillon n°MS13).

## Comparaison avec la distribution réelle

Les coordonnées géographiques précises de chaque échantillon ainsi que la fraction de pollens de *Cedrus atlantica* qu'il contient sont donc connues. Ces données permettent d'établir la carte de présence des pollens de *Cedrus atlantica* au Maroc. Comme l'objectif est ici de distinguer, sur base de leur pourcentage de présence dans l'échantillon, les pollens autochtones des allochtones, la carte dessinée à partir de ces pollens précise également leurs pourcentages.

La carte de situation de *Cedrus atlantica* au Maroc (figure 6) permet de distinguer les échantillons récoltés dans les cédraies. Ils sont rassemblés au sein de la catégorie « autochtones », soit 124. Parmi les 131 échantillons restants, qui ne devraient donc pas provenir d'une cédraie, 7 sites d'échantillonnage présentent des pourcentages de pollens de Cèdre supérieur à 18%. Ces valeurs étant largement supérieures à celles des autres sites, les 11 échantillons provenant de ces 7 sites sont rangés dans une catégorie « énigmatiques ». Cette catégorie n'est pas considérée dans la discussion qui suit. Les 120 autres échantillons forment la catégorie « allochtones ».

Le tableau 4 synthétise les résultats obtenus pour ces trois catégories. La comparaison des catégories autochtones



et allochtones permet d'affirmer que des pourcentages de pollen de *Cedrus atlantica* :  
 -supérieurs à 6% sont indicateurs d'un échantillonnage au sein de la cédraie,  
 -inférieurs à 0,12% sont indicateurs d'un échantillonnage hors de la cédraie.  
 Entre ces deux taux, la distinction entre pollens autochtones et allochtones n'est pas certaine. Toutefois, pour les taux supérieurs à 1%, dans environ huit cas sur dix les échantillons proviennent d'une cédraie ou de ses alentours immédiats. En effet, à peine 20% des échantillons allochtones présentent des taux supérieurs à 1% contre plus de 85% pour les échantillons autochtones. La limite entre échantillons autochtones et allochtones peut donc être raisonnablement fixée à 1% de pollens de *Cedrus atlantica*.

Plus d'informations sur les lieux d'échantillonnage « énigmatiques » permettraient de vérifier si des cèdres ne se trouvent pas à proximité de ces endroits, ce qui expliquerait les pourcentages élevés de pollen de Cedrus.

La figure 10 présente les cartes de pourcentages de pollens de *Cedrus atlantica* dans les échantillons autochtones et allochtones.

Tableau 4 : synthèse des résultats pour les échantillons avec pollen de *Cedrus atlantica*

Catégories	Autochtones	Allochtones	Enigmatiques
Nombre d'échantillons	124	120	11
% maximal de pollen de <i>Cedrus atlantica</i>	81,25%	6%	44,27%
% minimal de pollen de <i>Cedrus atlantica</i>	0,12%	0,05%	1,44%
% d'échantillons contenant plus de 1% de pollen de <i>Cedrus atlantica</i>	85,49%	20,84%	100%
% d'échantillons contenant plus de 2% de pollen de <i>Cedrus atlantica</i>	76,23%	9,17%	91,91%

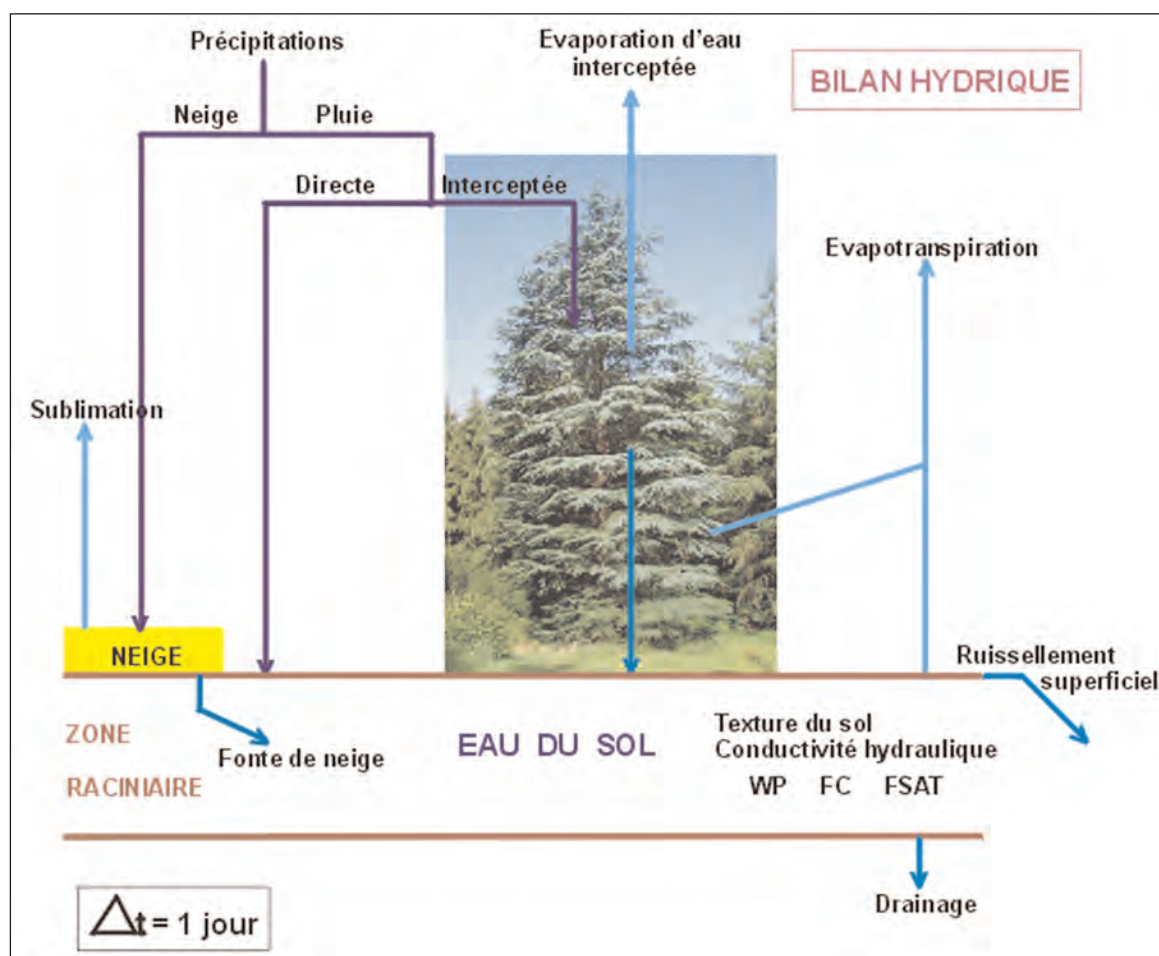


Figure 11: le modèle IBM (FANCOIS et al. 2006)

## MODELISATION

### Description des modèles

C'est une version couplée de deux modèles, IBM et CARAIB qui permet de réaliser les différentes modélisations. Le premier modèle évalue l'eau contenue dans le sol et l'épaisseur de la couverture neigeuse ; le second est un modèle mécaniste du cycle du carbone dans la biosphère terrestre (HUBERT *et al.*, 1998, OTTO *et al.*, 2002).

#### **IBM (Improved Bucket Model)**

Le modèle IBM (Improved Bucket Model) a été développé par Louis FRANCOIS et ses collaborateurs (WARNANT *et al.* 1994, HUBERT *et al.*, 1998) pour calculer la disponibilité en eau dans le sol en fonction des variables climatiques (précipitations, températures et humidité de l'air, vitesse du vent et ensoleillement). Outre la quantité d'eau présente dans le sol, il calcule également l'évapotranspiration réelle, le ruissellement et l'infiltration. Le « pas » de temps est d'une journée.

Les aspects pris en compte par le modèle sont représentés schématiquement à la figure 11.

#### **Précipitations (PRC)**

Le flux d'entrée d'eau dans le sol est constitué par les précipitations, qui sont elles-mêmes réparties entre pluie et neige. Cette répartition est fonction des extrema de température diurnes,  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$  (°C)

Si la température minimum diurne,  $T_{\min}$  (°C), est positive les précipitations prendront la forme de pluie. Par contre, si la température maximum diurne,  $T_{\max}$  (°C) est négative, des précipitations neigeuses se produisent (HUBERT *et al.*, 1998; WARNANT, 1999).

Enfin dans le cas où  $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C} < T_{\max}$ , le modèle interpolera linéairement entre les cas  $T_{\max} = 0^{\circ}\text{C}$  et  $T_{\min} = 0^{\circ}\text{C}$  pour connaître les quantités de pluie et de neige.

Les précipitations sous forme de neige donnent lieu à une accumulation dans un réservoir « neige ». Les flux de sorties de ce réservoir sont la fonte et la sublimation. La fonte dépend de la valeur de  $T_{\max}$  et la sublimation est calculée de manière similaire aux autres flux d'évaporation sur la fraction de la surface du sol occupée par la neige (cfr ci-dessous). L'eau provenant de la fonte de neige s'infiltre dans le sol et donne lieu éventuellement à un ruissellement superficiel (« Runoff », RU) si le flux d'eau provenant de la fonte est supérieur à un taux d'infiltration critique dépendant de la conductivité du sol.

#### **Evapotranspiration réelle (AET)**

La totalité des précipitations n'atteint pas le sol, car une partie est toujours interceptée par le couvert végétal (sauf lorsqu'il est inexistant comme dans les déserts) et ensuite ré-évaporée. Cette fraction interceptée et ré-évaporée dépend de l'intensité des précipitations et de l'indice foliaire (LAI) du couvert végétal, grandeur calculée par le modèle de végétation CARAIB. La fraction non interceptée atteint le sol et peut s'y infiltrer et éventuellement donner lieu à un ruissellement superficiel de manière analogue au flux de fonte de neige discuté ci-dessus. L'eau présente dans le sol peut s'évaporer (évaporation du sol) ou être prélevée par les végétaux et ensuite être transpirée (transpiration). Ces deux processus ne sont pas séparés dans le modèle IBM, seule leur somme (évapotranspiration du sol) est évaluée. L'évapotranspiration réelle totale (AET) est la somme de l'évaporation de la neige, l'évaporation interceptée et l'évapotranspiration du sol. L'évaporation de la neige et l'évaporation interceptée ont lieu au taux potentiel calculé par la formule de PENMAN (1998) pour autant que la neige soit présente ou que le couvert soit mouillé, sur les surfaces respectives couvertes par la neige ou le couvert. L'évapotranspiration du sol a lieu sur la fraction du pixel non couverte

par la neige ou par un feuillage humide. Elle est évaluée comme une fraction du taux d'évapotranspiration potentielle (PENMAN). Cette fraction dépend du contenu en eau du sol calculé par le modèle.

#### Contenu d'eau dans le sol (**SW**), ruissellement (**RU**) et drainage (**DR**)

Le contenu d'eau dans le sol peut varier entre le point de flétrissement (WP) et la saturation (FS). En effet, les diminutions en dessous du point de flétrissement qui pourraient avoir lieu dans les premiers centimètres du sol ne sont pas prises en compte par le modèle qui évalue le budget de la couche racinaire dont l'épaisseur est de l'ordre du mètre. A la saturation, l'eau excédentaire est évacuée par ruissellement (RU). Entre la saturation et la capacité au champ (FC), se produit un drainage vers le bas. Ce flux de drainage (DR) est relié à la conductivité du sol, elle-même calculée par une paramétrisation (SAXTON et *al.* 1986) dépendant du contenu en eau et de la texture du sol (% sable, % limon, % argile). Le contenu d'eau dans le sol disponible pour la végétation est exprimé de manière relative selon l'expression suivante :

$$ASW = (SW - WP) / (FC - WP)$$

où SW représente la quantité d'eau présente dans le sol, exprimée comme une lame d'eau (mm).

Les quantités d'eau à la saturation (FS), à la capacité au champ (FC) et au point de flétrissement (WP) sont évaluées en fonction de la texture (SAXTON et *al.* 1986). L'épaisseur du sol correspond à l'épaisseur de la couche racinaire qui, dans la version utilisée du modèle, est de 0,1 m pour les lithosols et 1 m dans les autres cas.

#### **CARAIB** (*CAR*bon *Assimilation In the Biosphère*)

Il s'agit d'un modèle mécaniste du cycle du carbone dans la biosphère terrestre. Il simule les stocks de carbone de la végétation et les flux de carbone existant entre la végétation, l'atmosphère et le sol (WARNANT et *al.*, 1994 ; HUBERT et *al.* 1998 ; WARNANT, 1999 ; OTTO et *al.*, 2002 ; LAURENT et *al.*, 2004). Sa résolution spatiale est de 10'x10' en longitude et latitude. 10' correspondent à environ 18 km à l'équateur. Le « pas » de temps est de 1 jour pour l'actualisation des réservoirs. Les flux de photosynthèse et de respiration autotrophe sont par contre évalués toutes les deux heures pour tenir compte de la variation de l'éclairement solaire et de la température au cours de la journée.

L'une des sorties les plus importantes du modèle est la productivité primaire nette (« Net Primary Productivity » ou NPP). Elle correspond au taux net d'absorption de carbone par les plantes vivantes.

Cinq réservoirs de carbone sont considérés par le modèle (OTTO et *al.*, 2002) :

- les feuilles et racinelles (GC, pour « green carbon »),
- le reste de la plante : le tronc, les branches et les racines ligneuses(RC, pour « remaining carbon »),
- la litière provenant des feuilles et racinelles (GL, pour « green litter »),
- la litière provenant du reste de la plante (RL, pour « remaining litter »),
- l'humus, produit par la décomposition des litières (SC, pour « soil carbon »).

Les différents flux de carbone et d'eau pris en compte par le modèle sont les suivants:

#### Budget en eau du sol

L'eau du sol a une influence sur le taux de photosynthèse via le processus de régulation stomatique. Elle conditionne également l'ampleur maximum du feuillage de la plante. Enfin, elle induit une mortalité des tissus végétaux (formation de litière feuilles et

radicelles ou reste de la plante) lorsque sa valeur se situe en dehors d'un intervalle [SWmin, SWmax] caractéristique de la plante et des tissus considérés. C'est le modèle IBM qui calcule la disponibilité d'eau dans le sol. Son fonctionnement est expliqué précédemment.

### Photosynthèse

CARAIB divise la canopée en plusieurs strates pour lesquelles il estime la radiation active. La proportion entre les flux directs et diffus dépend de la couverture nuageuse. La distinction entre les effets de la lumière directe et diffuse est prise en compte. Plus précisément, la propagation de la lumière sous le couvert végétal est calculée grâce à la définition d'un indice foliaire (LAI, pour « leaf area index »). Ce LAI correspond à la surface de feuilles par mètre carré de sol. On calcule séparément la photosynthèse des feuilles éclairées par la lumière du soleil et celle des feuilles d'ombre.

Les mécanismes de photosynthèse des plantes en  $C_3$  et en  $C_4$  sont gérés par le modèle. Les plantes en  $C_3$  utilisent le cycle de Calvin, parfois appelé la voie en  $C_3$  pour fixer le  $CO_2$ . Ce cycle se déroule en trois étapes. Le nom de voie en  $C_3$  vient du fait que le premier produit décelable du cycle de Calvin est une molécule, la PGA qui contient trois atomes de carbone. Dans ce cas, c'est le modèle photosynthétique de FARQUHAR et *al.* (1980) qui est utilisé. Le cèdre est une plante en  $C_3$ . Chez les plantes en  $C_4$ , le premier produit décelable de la fixation du  $CO_2$  peut être l'oxaloacétate, une molécule à quatre atomes de carbone. Les calculs sont alors faits selon le modèle de COLLATZ et *al.* (1992). Certaines plantes cultivées comme le maïs, la canne à sucre ou encore le sorgho sont des exemples de plantes en  $C_4$  (RAVEN et *al.*, 2000). Quelques réactions importantes de la photosynthèse méritent d'être un peu plus détaillées.

L'assimilation nette de carbone par les feuilles,  $A_n$  (en  $\mu\text{mol C m}^{-2} \text{S}^{-1}$ ) est donnée par la relation :

$$A_n = A - R_d$$

où :  $A$  est l'assimilation photosynthétique brute et  $R_d$  la respiration sombre.

$R_d$  est essentiellement fonction de la température, de la biomasse vivante et du rapport C/N des tissus foliaires.

$A$  est limitée par les réactions claires,  $A_j$  (chaîne de transfert d'électrons initiée par l'absorption des photons) ou sombres,  $A_v$  (carboxylation, c'est-à-dire la formation de composés à plusieurs atomes de carbone à partir du  $CO_2$  absorbé) :

$$A = \min (A_j, A_v)$$

Le modèle calcule également la conductance stomatique. C'est par les stomates que le  $CO_2$  nécessaire à la photosynthèse diffuse à l'intérieur de la feuille et que l'oxygène produit comme déchet s'évacue vers l'extérieur.

La concentration intercellulaire de  $CO_2$  dans la feuille,  $c_i$  se calcule suivant l'équation :

$$c_i = c_a - A_n / g$$

$c_a$  est la concentration de  $CO_2$  atmosphérique (FRANCOIS et *al.*, 1999). Cette équation exprime la conservation du  $CO_2$  dans le milieu intercellulaire de la feuille.



$g$  est la conductance stomatique. Elle est décrite par l'équation (BALL et *al.*, 1987) :

$$g = g_0 + g_1 A_n h_s / (c_a - \Gamma^*)$$

$g_0$  donne la valeur de la conductance minimale et  $g_1$  la pente de la régression,

$h_s$  l'humidité relative,

$\Gamma^*$  le point de compensation en l'absence de respiration sombre, il vaut :

$$\Gamma^* = 0.21 K_c O_2 / (2 K_o)$$

$K_c$  est la constante de Michaelis-Menten pour  $CO_2$  et  $K_o$  pour  $O_2$ ,

$O_2$  est la concentration intercellulaire en  $O_2$  (21%).

Les constantes cinétiques  $K_c$  et  $K_o$  dépendent de la température.

Après la définition de ces variables, les équations décrivant les réactions claires et sombres ne comportent plus que  $J$  et  $V_{\max}$  comme inconnues :

$$A_i = J (c_i - \Gamma^*) / 4 (c_i + 2 \Gamma^*)$$

$J$  est le taux de transport d'électron potentiel.

$$A_v = V_{\max} (c_i - \Gamma^*) / c_i + K_c (1 + O_2 / K_o)$$

$V_{\max}$  est la vitesse de carboxylation maximum.

Le modèle résout le système non linéaire défini par l'ensemble des équations reprises ci-dessus pour obtenir  $c_i$ ,  $g$ ,  $A$ ,  $A_n$ ,  $A_j$  et  $A_v$ . Ce système est réduit à une seule équation du 3ème degré en  $A$ , dont la solution est trouvée analytiquement.

### Respiration autotrophe

Elle se subdivise en deux composantes : la respiration de maintenance et la respiration de croissance. La première est une fonction exponentielle de la température et linéaire du contenu en carbone des réservoirs GC et RC. La seconde est proportionnelle à la croissance de la biomasse (OTTO et *al.*, 2002).

### Allocation des photosynthates

Le carbone assimilé durant la photosynthèse est réparti entre les réservoirs GC et RC en fonction du climat. Une certaine quantité est utilisée pour le maintien de la plante, le reste peut servir à la croissance. En fait, une partie du carbone n'est allouée aux feuilles que pour des conditions de température et d'humidité favorables aux plantes considérées. Si la productivité est suffisante pour compenser la mortalité des feuilles, une nouvelle couche foliaire peut être créée. Le nombre de couches foliaires est limité par un maximum ( $LAI_{\max}$ ) qui dépend de la biomasse de tissus structuraux (bois) et de la disponibilité en eau (l'évaporation du couvert ne peut excéder le flux d'évapotranspiration calculé par le modèle hydrologique). En cas de stress, la totalité du carbone assimilé est allouée au réservoir RC (OTTO et *al.*, 2002).

### Production de litière et mortalité

La litière est constituée par les feuilles et racelles mortes, GL, et du bois et racines ligneuses morts, RL. Elle s'accumule à la surface ou dans le sol.

La chute des feuilles est saisonnière chez les espèces décidues. Ce mécanisme est contrôlé par la température, le contenu d'eau dans le sol et l'ensoleillement.

Les plantes mortes peuvent l'être par simple régénération naturelle de la canopée, un temps de vie caractéristique étant associé aux différents types de plantes ou encore par la persistance de conditions climatiques défavorables.

### Respiration hétérotrophe

Cette respiration est due à la décomposition de la matière organique par les bactéries du sol ainsi que par les champignons. La décomposition dépend de la température, des contenus d'eau dans le sol et de carbone dans les deux litières.

Les résidus de la décomposition donnent lieu à la formation d'humus. Dans le modèle, cette formation d'humus correspond à 20% de la quantité totale de litière décomposée. Le reste du flux retourne à l'atmosphère sous forme de  $\text{CO}_2$ . Enfin, la décomposition de l'humus (SC) contribue également au flux de  $\text{CO}_2$  restitué à l'atmosphère (Figure 12).

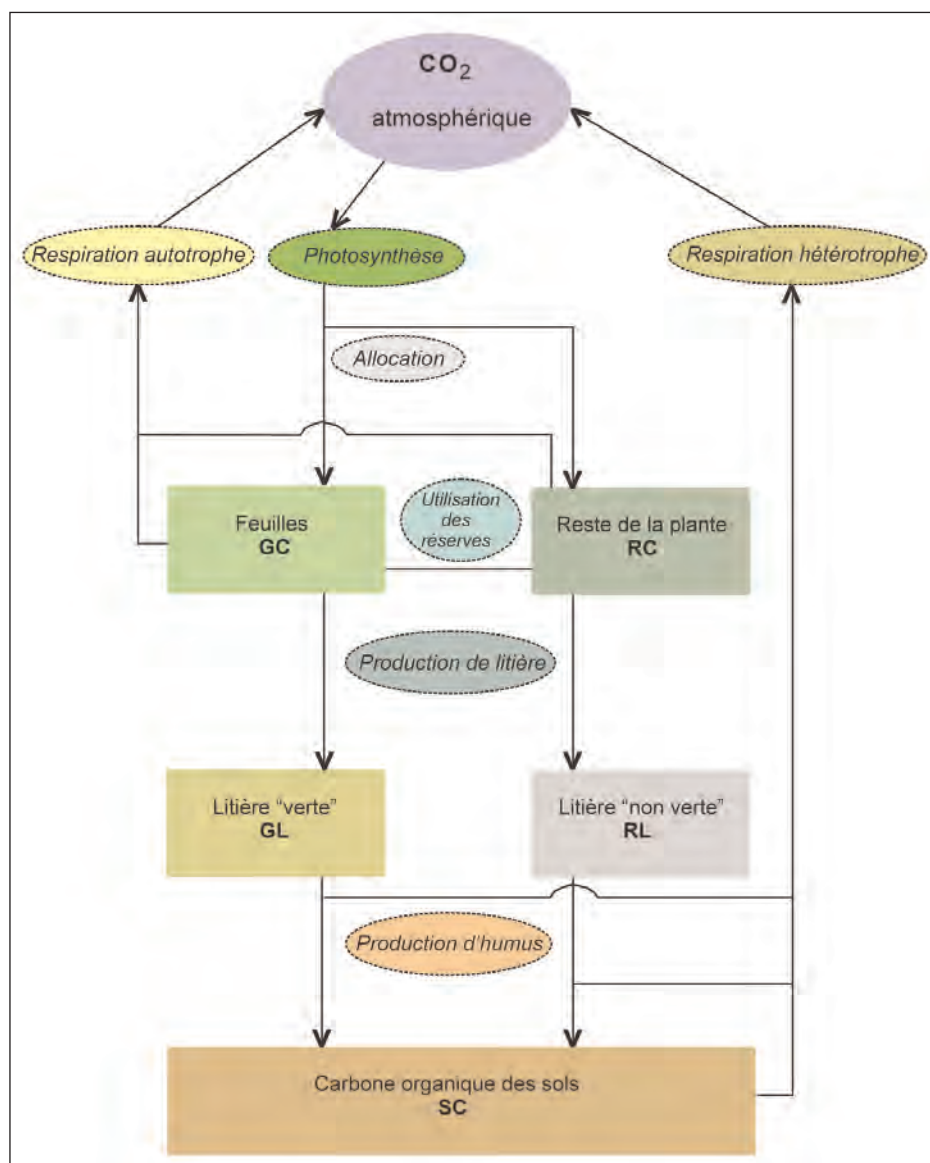


Figure 12: représentation schématique des cinq réservoirs et des flux (WARNANT, 1999)

## Biogéographie et BAGs

La NPP (Net Primary Productivity) et le LAI (Leaf Area Index) permettent de déterminer la fraction couverte par différentes associations végétales.

Les premières versions du modèle simulaient des PFTs, définis comme des ensembles de plantes ayant des réponses similaires aux conditions environnementales et ayant des effets similaires sur les processus de l'écosystème dominant (DIAZ & CABIDO, 1997).

Actuellement, plus de précision est apportée en utilisant des BAGs (LAURENT et *al.*, 2004; DUBOIS-LAURENT, 2005), c'est-à-dire des Groupes d'Affinité Bioclimatique définis par leurs enveloppes climatiques d'après les concepts de biogéographie prédictive. Ils sont caractérisés par des distributions géographiques différentes, liées à leurs tolérances et besoins climatiques.

25 BAGs ont été définis pour l'Europe d'après l'étendue géographique potentielle des taxons palynologiques : 13 sont composés d'arbres, 7 de buissons et 5 d'herbacées.

L'intégration des BAGs arborescents (Tableau 5) dans CARAIB ne pose pas de problèmes. Par contre, celle des BAGs arbustifs nécessiterait de plus amples modifications du modèle. Pour les BAGs herbacés, certaines retouches devraient également être apportées au modèle car, actuellement, le groupe est considéré dans son ensemble sans établir de distinctions plus précises que celles de plantes en C3 et en C4.

Tableau 5: BAGs arborescents (LAURENT et al. et DUBOISS - LAURENT, 2005)

BAG	Taxons palynologiques	Noms vernaculaires	Feuillage Phénologie
1	<i>Cedrus</i> <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinaster</i>	Cèdre Pin d'Alep, Pin maritime	Conifères sempervirents
2	<i>Abies alba</i> , <i>Taxus</i>	Sapin pectiné, If commun	
3	<i>Pinus cembra</i>	Pin cembro	
4	<i>Cupressaceae</i> , <i>Juniperus communis</i>	Cyprés (famille), Genévrier commun	
5	<i>Abies</i>	Sapins	
6	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus</i> , <i>P. sylvestris</i>	Épicéa, Pins, Pin sylvestre	
7	<i>Larix decidua</i>	Mélèze d'Europe	Conifères caducifoliés
8	<i>Olea europea</i> , <i>Phillyrea</i> , <i>Pistacia</i> <i>Quercus ilex</i> , <i>Quercus suber</i>	Olivier, Filaire, Pistachier, Chêne vert, Chêne liège	Feuillus sempervirents
9	<i>Castanea</i> , <i>Juglans</i> , <i>Ostrya</i> <i>Quercus pubescens</i>	Châtaignier, Noyer, Charme-houblon, Chêne pubescent	Feuillus caducifoliés
10	<i>Acer campestre</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Tilia platyphyllos</i>	Erable champêtre, Charme Hêtre, Tilleul à grandes feuilles.	
11	<i>Acer platanoïdes</i> , <i>Fraxinus</i> <i>Tilia cordata</i> , <i>Ulmus</i>	Erable plane, Frêne, Tilleul à petites feuilles, Orme	
12	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Coryllus avellana</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Populus</i>	Aulne glutineux, Noisetier, Chêne pédonculé, Peupliers	
13	<i>Betula</i> , <i>Salix</i>	Bouleaux, Saules	

Le modèle CARAIB considère dans un premier temps que tous les BAGs peuvent être présents dans un pixel. Ensuite, il ne conservera que ceux pour lesquels le climat est favorable. Il simulera également la compétition entre les strates pour l'accès à la lumière. Dans chaque strate, l'abondance des BAGs est supposée proportionnelle à leur productivité primaire nette.

L'espèce étudiée dans ce mémoire, *Cedrus atlantica*, fait partie du BAG 1 qui reprend *Cedrus atlantica* et *libani*, *Pinus halepensis* et *Pinus pinaster*. Lors des différentes modélisations, la distribution potentielle du BAG 1 sera toujours présentée avec celle de *Cedrus atlantica* seul. Un BAG d'herbacées comprenant *Asteraceae asteroideae*, *Asteraceae cichorioideae*, *Poaceae*, *Myriophyllum* et *Apiaceae* est également introduit dans la simulation.

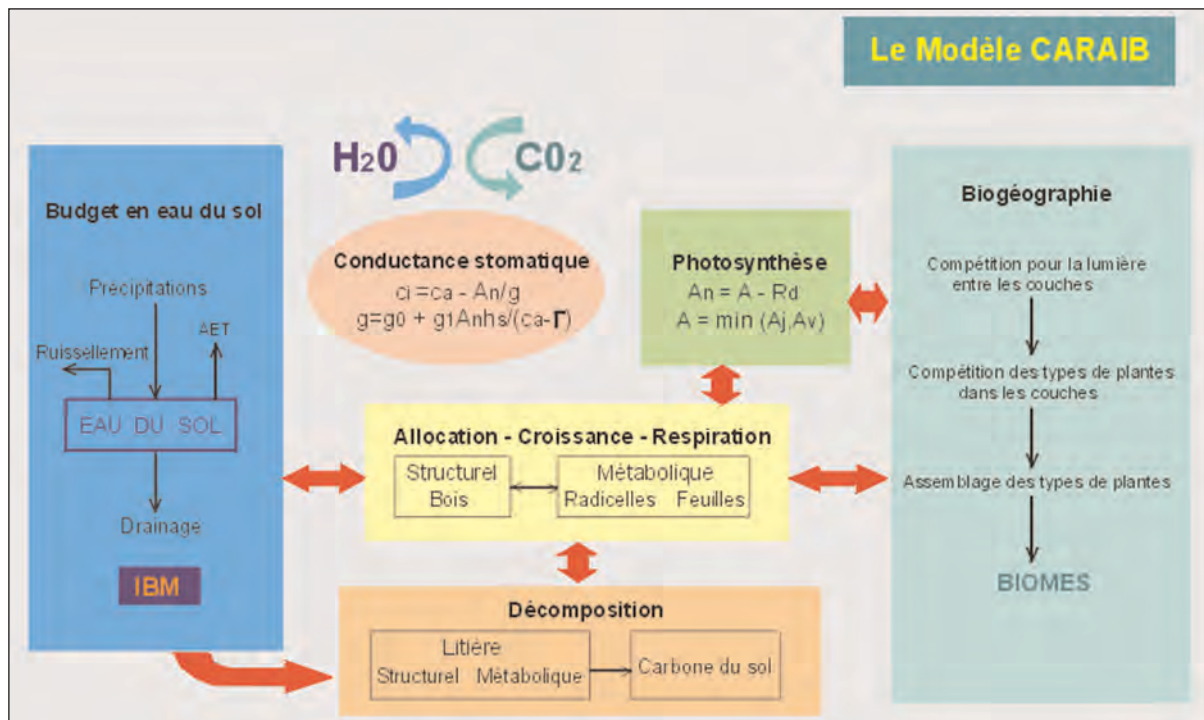


Figure 13: schéma des flux dans CARAIB (FRANCOIS, 2004)

### Résumé schématique

Les différents processus qui viennent d'être décrits sont représentés synthétiquement à la figure 13.

### Commentaires

CARAIB ne simule pas des aires réelles, mais potentielles. Elles correspondent aux endroits où les conditions climatiques permettent théoriquement la présence des différentes espèces végétales considérées.

Les aires réelles ne correspondent jamais à la totalité des aires potentielles, car d'autres facteurs que ceux gérés par le modèle peuvent intervenir dans la distribution des essences végétales.

Ainsi, il serait peut-être intéressant d'intégrer dans le modèle CARAIB des paramètres tels que le sol (chimie, physique), les barrières naturelles (mers, montagnes), la pression humaine (déboisements, reboisements...), animale (pâturages, attaques bactériennes, de chenilles...), la capacité de coloniser de nouveaux territoires (étendue de la zone de dispersion des pollens...).

### Données nécessaires

Plusieurs jeux de données ou paramètres sont nécessaires en entrée des modèles IBM et CARAIB. Les données d'entrée les plus importantes des deux modèles sont les données climatiques de la région étudiée. Elles sont fournies mensuellement (12 valeurs climatologiques) sur chaque cellule de la grille spatiale définie sur cette région. La texture du sol constitue également une des entrées du modèle IBM. Elle permet notamment d'évaluer la conductivité hydrique des sols utilisés dans le calcul des flux de ruissellement et de drainage.

Il est rare que les données nécessaires permettent de faire tourner directement le modèle. Généralement, il faut procéder à quelques opérations préalables pour les convertir à une résolution utilisable par CARAIB (pour rappel 10'x10') ; extraire la bonne variable (par exemple, l'ensoleillement peut être déterminé à partir de la couverture nuageuse).



Par ailleurs, chaque type de plante est caractérisé par un ensemble de paramètres décrivant la tolérance climatique de la plante (conditions climatiques induisant un stress sur la plante ou empêchant la germination ; contenu en azote des tissus ; taux de respiration ; profondeur racinaire moyenne).

Les paramètres décrivant la tolérance climatique conditionnent fortement l'aire de répartition de la plante. Lorsqu'un nouveau type de plante (BAG ou espèce) est défini dans le modèle, une étude statistique préalable de sa distribution géographique actuelle doit être effectuée en vue de déterminer les valeurs de ces paramètres. Les autres paramètres, quant à eux, sont définis soit à l'aide de données de la littérature relatives à l'espèce étudiée, soit en adoptant les valeurs assignées dans le modèle à un type de végétation similaire.

### *Données pédologiques*

Le modèle nécessite le détail de la texture du sol, c'est-à-dire le pourcentage moyen de sable, limon et argile dans la couche racinaire (essentiellement le premier mètre de sol). La version actuelle de CARAIB interpole ces données à partir de la carte de ZOBLER (1986) en 1°x1° disponible sur l'ensemble des continents et dérivée de la carte des sols de la FAO. La carte de ZOBLER fournit aussi le type de sol qui permet d'identifier les zones de lithosols, sur lesquels la profondeur racinaire est supposée égale à 10 cm.

### *Données climatiques*

CARAIB requiert 6 entrées climatiques :

- Tem** : la température moyenne journalière, en °C,
- Dte** : l'amplitude de la variation diurne de température, en °C,
- Shr** : l'ensoleillement relatif, en %,
- Rhu** : l'humidité relative de l'air, en %,
- Wnd** : la vitesse horizontale du vent, en m/s,
- Prc** : les précipitations, en mm.

Ces données doivent être mensuelles. Ainsi, les fichiers d'entrées climatiques comportent-ils toujours 14 colonnes. Les deux premières indiquent la localisation du pixel (longitude, latitude) et les douze suivantes, les valeurs mensuelles de ce pixel.

Un générateur stochastique de variables météorologiques permet d'obtenir des variables journalières à partir de ces données mensuelles. Ce générateur est très utile car il permet de prendre en compte le caractère non linéaire de certaines variables climatiques (HUBERT et *al.*, 1998).

### *Paramètres caractérisant les types de végétation*

Comme mentionné précédemment, il est important de détenir une carte précise de distribution de la végétation pour définir au mieux les paramètres de tolérance climatique des différentes espèces. La comparaison de la carte de présence de *Cedrus atlantica* au Maroc (figure 6) avec différentes cartes climatiques a ainsi permis d'extraire les paramètres de tolérance climatique de cette essence. Ceux du BAG 1 ont été fournis par Madame DUBOIS-LAURENT (comm.pers., 2006). Ils sont repris dans le tableau 6.

**Ic4** précise s'il s'agit d'une plante en C4.

**idec** précise s'il s'agit d'une plante décidue.

**tmin1** indique la température minimale que peuvent supporter les feuilles et racinelles (GC)

**tmin2** précise cette température minimum pour le reste de l'arbre (RC).

**tmax1** et **2** indiquent les températures maximales que supportent les réservoirs GC et RC.

**SW1** et **SW2** donnent les valeurs minimales d'eau dans le sol que peuvent tolérer respectivement le réservoir GC et le réservoir RC.

Tableau 6: paramètres de tolérance climatique

BAG's name	ic4	idec	tmin1	tmin2	tmax1	tmax2
<i>Cedrus</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinaster</i>	0	0	-8.7	-8.7	36.5	36.5
<i>Cedrus atlantica</i>	0	0	-9.9	-9.9	33.3	33.3
BAG's name	SW1	SW2	GDD5 min	Tmax germ	pgerm	
<i>Cedrus</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus pinaster</i>	0.03	0.03	1940	7.4	0.4	
<i>Cedrus atlantica</i>	0.02	0.02	2184	3.2	0.4	

Le GDD5 correspond au cumul annuel des températures diurnes excédant 5°C, c'est-à-dire :

$$GDD5 = \sum (T_d - 5)$$

où  $T_d$  est la moyenne diurne de la température exprimée en °C et où la somme est restreinte à l'ensemble des jours où  $T_d > 5^\circ\text{C}$ . GDD5 mesure ainsi la longueur et le niveau de chaleur de la saison de végétation. Chaque espèce est caractérisée par une valeur minimale du GDD5 nécessaire à son établissement dans une région donnée.

**Tmax germ** traduit le besoin de froid de la plante pour germer : la germination n'est possible que si, dans la climatologie, la température du mois le plus froid est inférieure à Tmax germ.

**pgerm** est un coefficient représentant la probabilité de germination des différentes plantes. Dans la version actuelle de CARAIB, il est supposé égal à 0.4 pour les conifères et 1 pour les autres plantes, traduisant les différences de potentialité de germination entre les gymnospermes et angiospermes. Ce paramètre n'influence pas la croissance de la plante, mais uniquement son succès d'établissement dans une région donnée et donc son abondance relative par rapport aux autres plantes.

La fréquence de chute des feuilles est un autre paramètre important que requiert le modèle, notamment pour calculer la NPP. Dans des conditions climatiques normales, la chute des feuilles du BAG 1 a lieu tous les 5 ans, tandis que les aiguilles de *Cedrus atlantica* tombent tous les 3 ans. En cas de stress, cette chute peut être anticipée.

Ces différentes valeurs sont utilisées sans modifications pour les différentes modélisations, passées, actuelles ou futures. En effet, on considère que les caractéristiques physiologiques des espèces ne varient pas au cours du temps. CARAIB induit donc que les variations de distribution des végétaux sont uniquement dues aux modifications climatiques.

## Modélisations

### *Climat actuel, passé et prévisions futures*

Trois modélisations sont proposées dans ce travail :

- une pour le passé, à **6k**, dans la période Atlantique,
- une pour l'actuel, en **2000**,
- une pour le futur proche, en **2100**.

Les territoires traités sont compris dans le rectangle de coordonnées suivantes :

- **nord** : 72° de latitude nord,
- **sud** : 28° de latitude nord,
- **ouest** : 12° de longitude ouest,
- **est** : 40° de longitude est.

Ce rectangle englobe l'Europe, à l'exception de l'Islande, et les pays du pourtour méditerranéen.

Comme déjà précisé dans le chapitre précédent, les paramètres caractérisant les types de plantes et les données de texture des sols restent inchangées quelle que soit l'époque considérée pour la modélisation. En effet, les périodes étudiées sont suffisamment restreintes pour que l'on puisse considérer que les changements physiologiques et de texture des sols n'influent pas sur la répartition des espèces végétales. Par contre, il est indispensable de disposer de données climatiques valables pour chacune des dates examinées. Leurs détails sont repris ci-dessous.

### *Données climatiques actuelles*

Pour la simulation actuelle, CARAIB utilise le set de données climatiques en 10'x10' proposé par NEW et *al.* (2002). Les 6 entrées requises par CARAIB se présentent sous forme de données mensuelles. Elles sont interpolées d'après les données fournies par des stations météorologiques (de 3952 stations pour la vitesse du vent à 27075 stations pour les précipitations) réparties sur l'ensemble de la planète pour la période allant de 1961 à 1990.

Les cartes des températures (en °C) moyennes et des précipitations cumulées (en mm) pour les mois de janvier et de juillet, obtenues avec les données de NEW et *al.* (2002) sont présentées aux figures 15 et 16.

En janvier comme en juillet, les pays scandinaves affichent les températures les plus froides (il fait de -20°C en janvier à +4°C en juillet à l'intérieur des terres) et c'est en Afrique du Nord que les températures sont les plus élevées (de 20°C en janvier à près de 40°C en juillet dans le Sahara). Les températures diminuent en altitude. En janvier, dans certaines régions montagneuses nord-africaines, on atteint 0°C de moyenne. D'une manière générale, pour janvier, les températures augmentent en allant du nord-est au sud-ouest, ainsi qu'en se rapprochant des côtes. En juillet, le gradient est plutôt nord-sud.

La répartition des précipitations ne suit pas cette logique. C'est le long des côtes exposées à l'Atlantique qu'il pleut le plus en janvier avec des maxima dans le nord du Royaume-Uni (380mm). Les rivages de la Méditerranée et les massifs montagneux sont également bien arrosés (généralement plus de 100mm/mois). En juillet, les régions les plus pluvieuses sont l'Ecosse et la Norvège ainsi que les Alpes et les Carpates. Le gradient est nord-sud. La zone située en dessous du 40<sup>ème</sup> parallèle, montagnes comprises, est très aride et reçoit moins de 50mm d'eau sur le mois. Celle au-dessus du 40<sup>ème</sup> parallèle reçoit entre 50 et 100mm.

### *Données climatiques passées*

Les données climatiques proviennent du GCM (modèle de circulation générale) UBRIS-HadCM3M2 (PMIP2, 2005). Elles ne sont pas utilisées telles quelles par le modèle CARAIB. Préalablement, des anomalies sont calculées en vue de les combiner avec les valeurs des variables climatiques actuelles (FRANCOIS et *al.*, 1998).

Ces anomalies sont soit absolues,  $\Delta q_{abs}$ :

$$\Delta q_{abs} = q_{6k} - q_{prés}$$

soit relatives,  $\Delta q_{rel}$  :

$$\Delta q_{rel} = (q_{obs} / q_{prés})(q_{6k} - q_{prés})$$

$q_{6k}$  et  $q_{prés}$  sont les valeurs des variables issues des simulations du GCM pour 6k et pour l'actuel et  $q_{obs}$  celles observées actuellement. Ces anomalies sont ensuite sommées au climat observé aujourd'hui.

Les données utilisées par le modèle à 6k,  $q_{cor}$ , correspondent donc soit à :

$$q_{cor} = q_{obs} + \Delta q_{abs} \text{ (correction absolue),}$$

soit à :

$$q_{\text{cor}} = q_{\text{obs}} + \Delta q_{\text{rel}} \text{ (correction relative).}$$

Dans le traitement choisi, les champs de température utilisent toujours une correction absolue. Les champs de précipitation, par contre, privilégient une correction relative (plus compatible avec les équations de conservation de l'eau utilisées dans le modèle climatique) lorsque cela est possible, c'est-à-dire lorsque cette correction ne tend pas à produire des valeurs négatives de la précipitation. Dans ce dernier cas, une moyenne pondérée des corrections absolues et relatives est effectuée. Les champs d'ensoleillement et d'humidité relative combinent également une correction absolue et relative. Enfin, les champs de vent utilisent une correction relative.

Les cartes des températures (en °C) moyennes et des précipitations (en mm) pour les mois de janvier et de juillet obtenues à partir de ces données corrigées sont reprises aux figures 15 et 16.

Les températures moyennes du mois de janvier à 6k sont fort proches de celles de l'année 2000. C'est toujours en Scandinavie et dans l'est de l'Europe qu'il fait le plus froid, même si les moyennes sont généralement plus élevées de 1 voir 2°C par rapport à aujourd'hui. L'Afrique du Nord reste également la zone la plus chaude, mais à l'inverse des régions nordiques, les moyennes sont un peu plus faibles qu'actuellement. Par contre, on constate un réchauffement global pour le mois de juillet, à 6k. Les moyennes de ce mois pouvant augmenter localement de 4°C.

Les précipitations du mois de janvier à 6k sont moins contrastées qu'aujourd'hui. C'est toujours le long des côtes exposées à l'Atlantique que les précipitations sont les plus abondantes. Cependant, les maxima sont moins importants (140mm sur l'Irlande et l'Ecosse). Le reste des terres connaît des précipitations proches de celles d'aujourd'hui. On constate juste une augmentation d'eau dans les zones septentrionales. L'Espagne et l'Afrique du Nord sont un peu plus sèches qu'actuellement. Au mois de juillet, le visage qu'offrent les précipitations est à peu de chose près le même qu'aujourd'hui. Le fait que les précipitations concordent moins bien avec le relief montagneux de l'Afrique du Nord constitue la différence la plus flagrante.

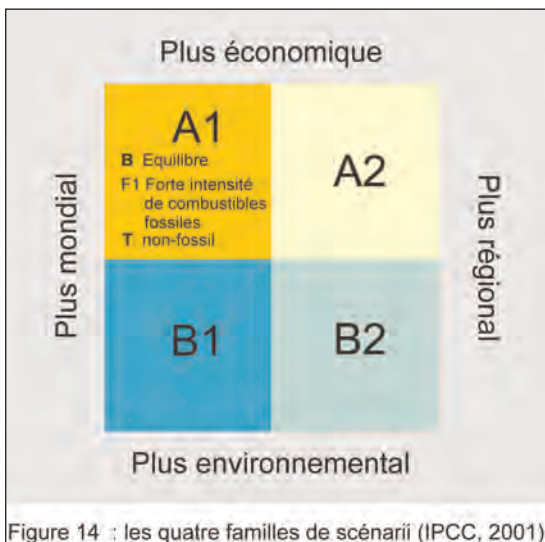
### *Données climatiques futures*

Les données climatiques futures sont traitées, tout comme les passées, par anomalies. Elles proviennent du modèle ARPEGE. Elles ont été développées selon le scénario A2 de l'IPCC. Comme tous les scénarii A, il suppose que l'aspect économique prime sur l'aspect environnemental dans la motivation des décisions politiques. Le 2 décrit un monde très

hétérogène : les identités locales sont préservées et le développement économique a une orientation principalement régionale (figure 14). Les schémas de fécondité entre les régions convergent très lentement avec pour résultat un accroissement continu de la population (IPCC, 2001).

Les cartes climatiques issues du modèle ARPEGE sont reprises aux figures 15 et 16.

La tendance générale est au réchauffement, avec un accroissement moyen d'environ 4°C. Certaines régions connaissent des augmentations plus importantes (il pourrait faire de 5 à 6°C de plus dans certaines zones du Maghreb) que d'autres (le nord de l'Ecosse ne devrait pas connaître de réchauffement significatif). D'une manière générale, la Scandinavie reste la zone la plus





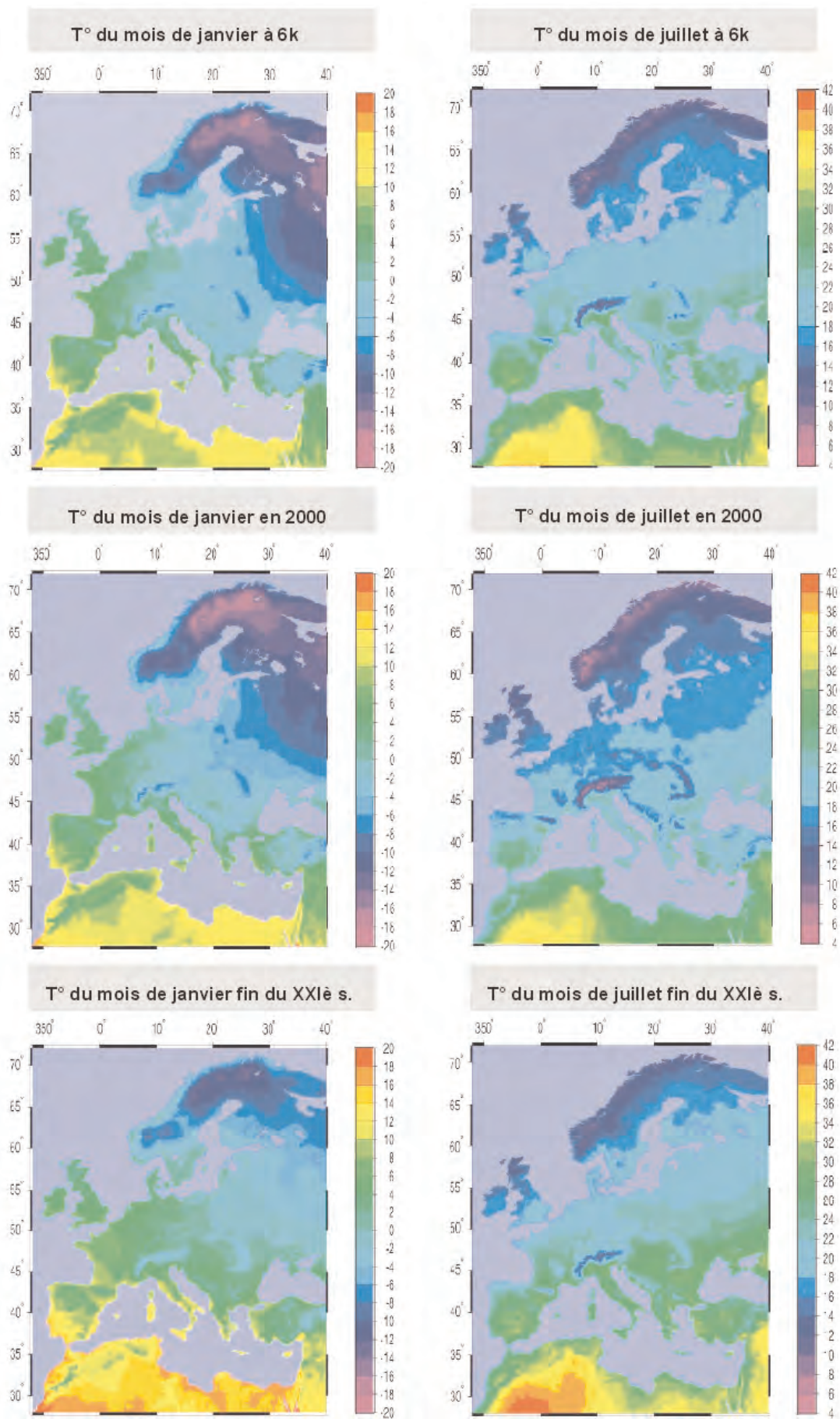


Figure 15: Températures moyennes des mois de janvier et de juillet, respectivement:

- à 6000 ans B.P.
- en l'an 2000
- à la fin du 21ème siècle

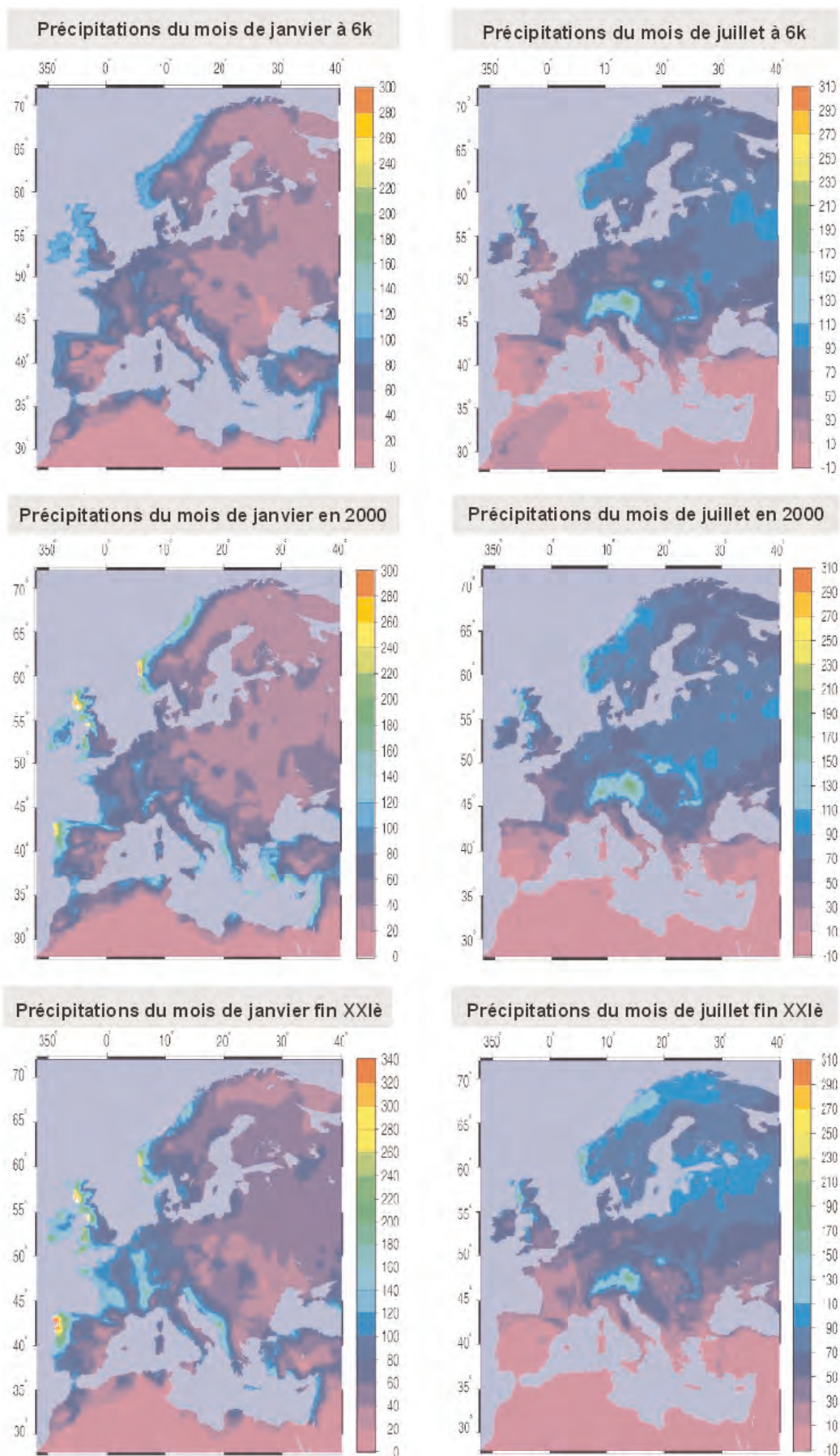


Figure 16: Précipitations moyennes des mois de janvier et de juillet, respectivement :

- à 6000 ans B.P.
- en l'an 2000
- à la fin du 21ème siècle



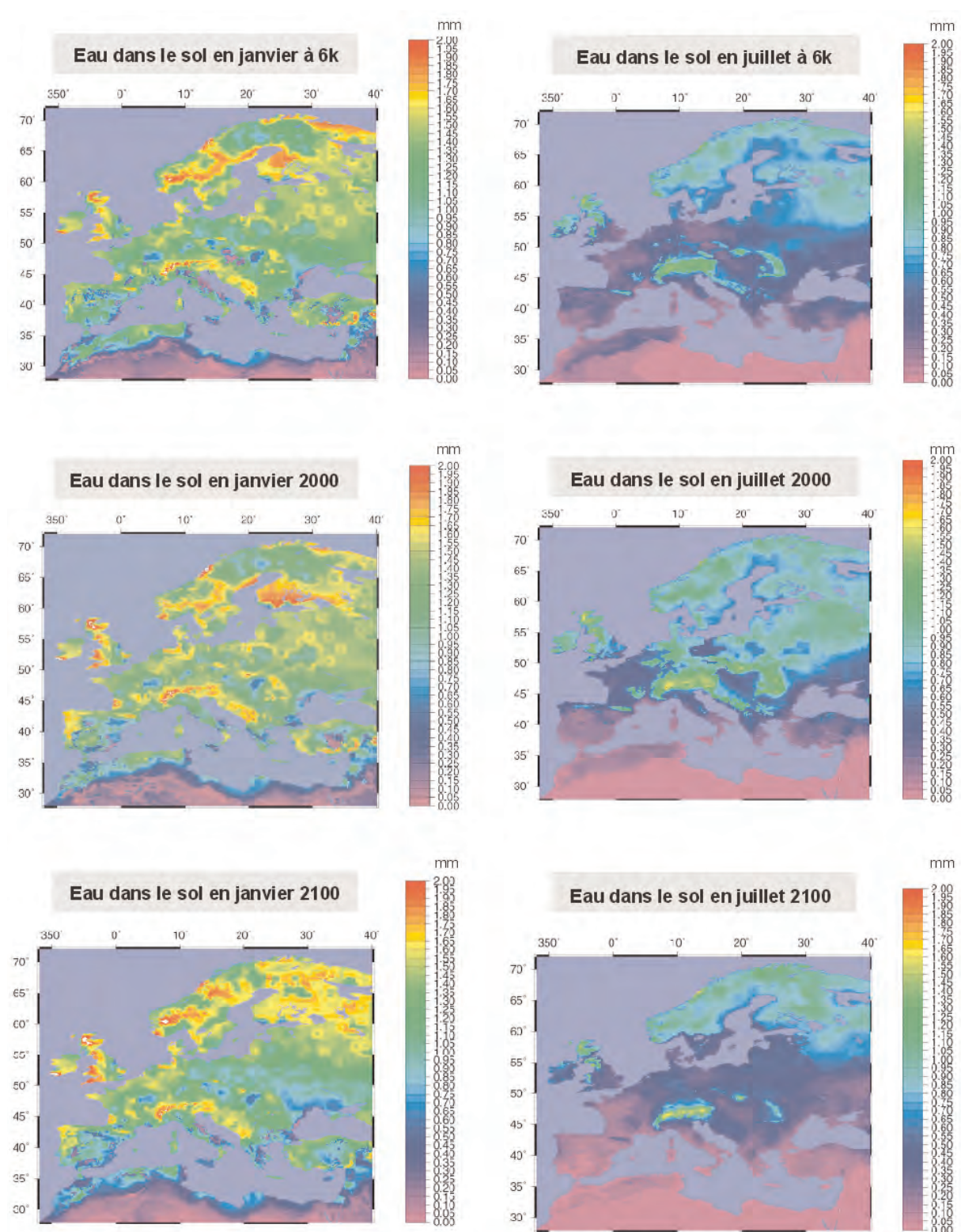


Figure 17 : quantité d'eau dans le sol estimée pour 6k, 2000 et 2100.

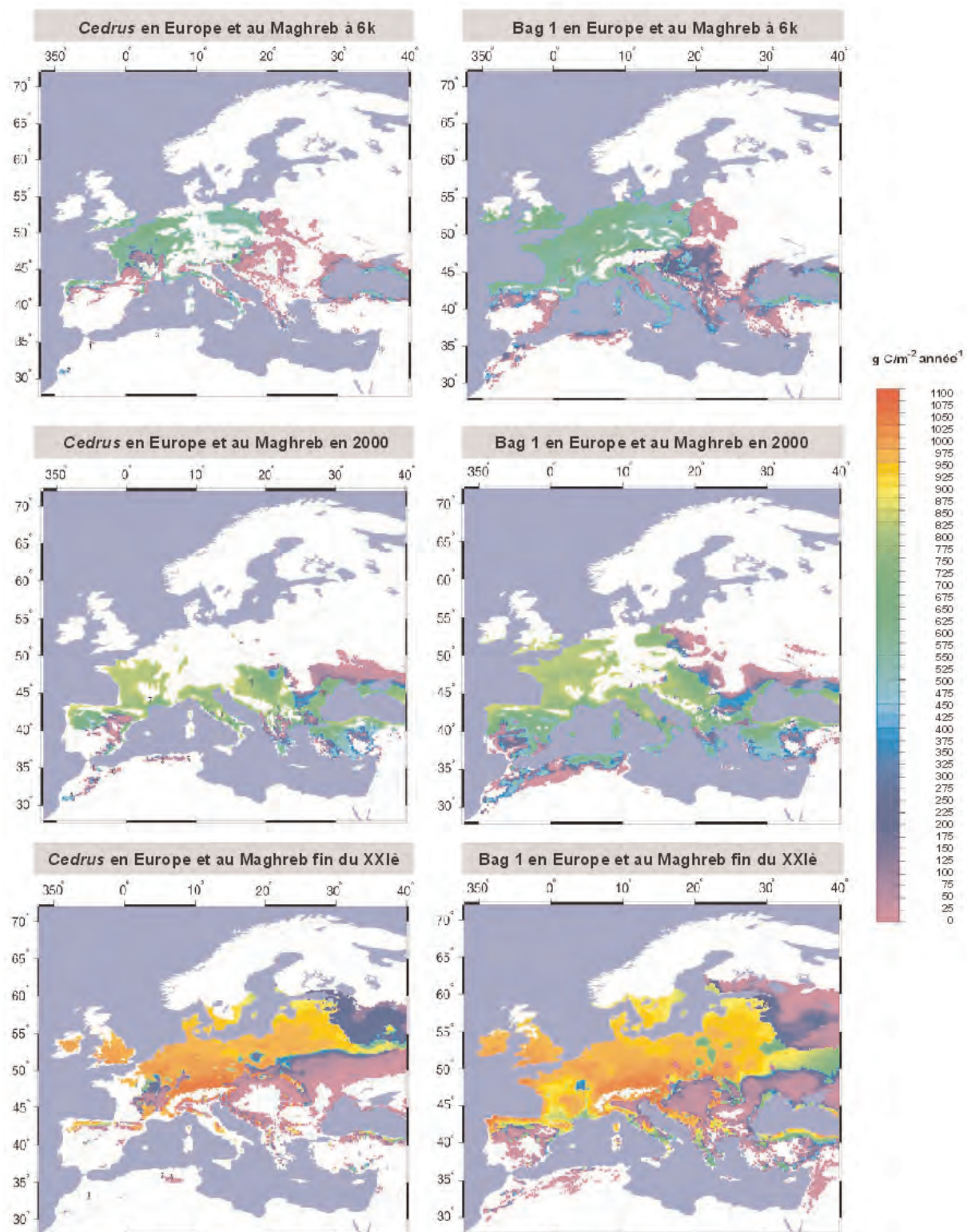


Figure 18: aire de distribution potentielle de *Cedrus atlantica* et du Bag1; respectivement:

- à 6000 ans B.P. (avec 265 ppm de CO<sub>2</sub>)
- en l'an 2000 (avec 368 ppm de CO<sub>2</sub>)
- fin du 21<sup>ème</sup> siècle (avec 750 ppm de CO<sub>2</sub>)

Les couleurs représentent les valeurs de la productivité primaire nette



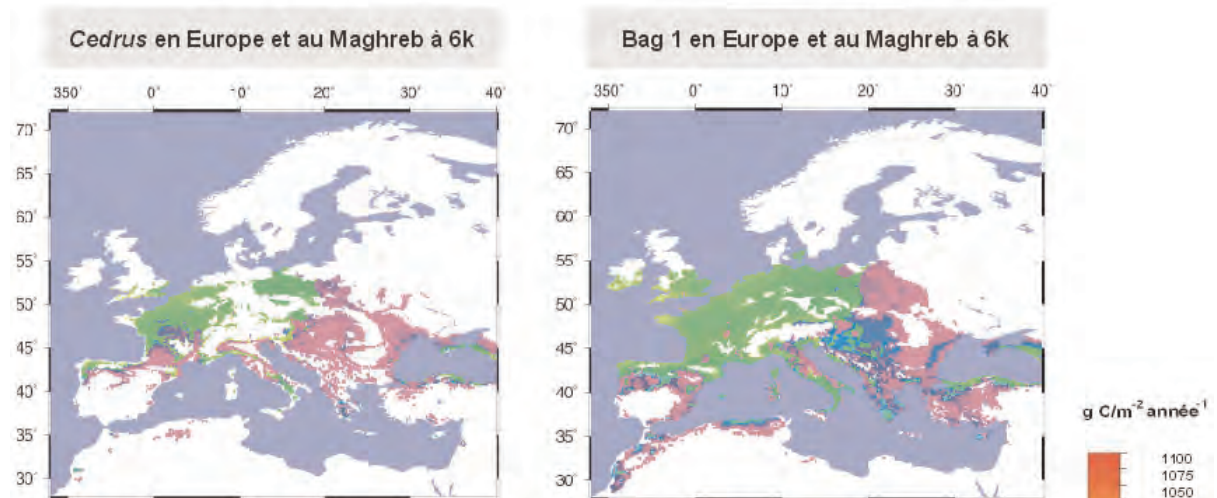


Figure 19: aire de distribution potentielle du Cèdre et du Bag 1 à 6k avec 368 ppm de CO<sub>2</sub>

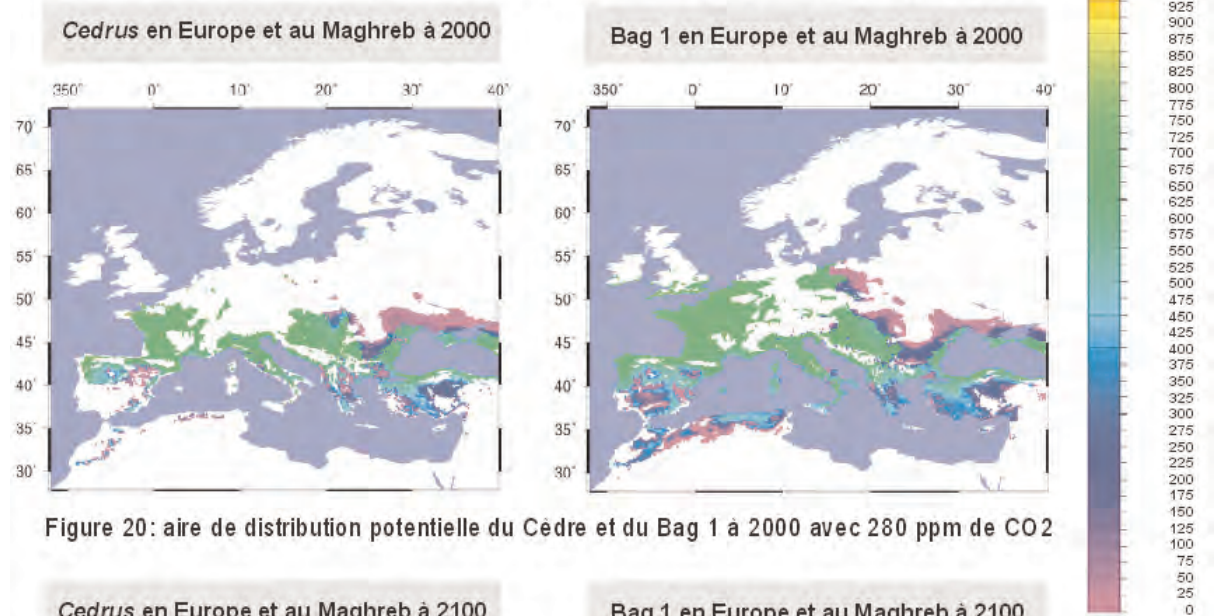


Figure 20: aire de distribution potentielle du Cèdre et du Bag 1 à 2000 avec 280 ppm de CO<sub>2</sub>

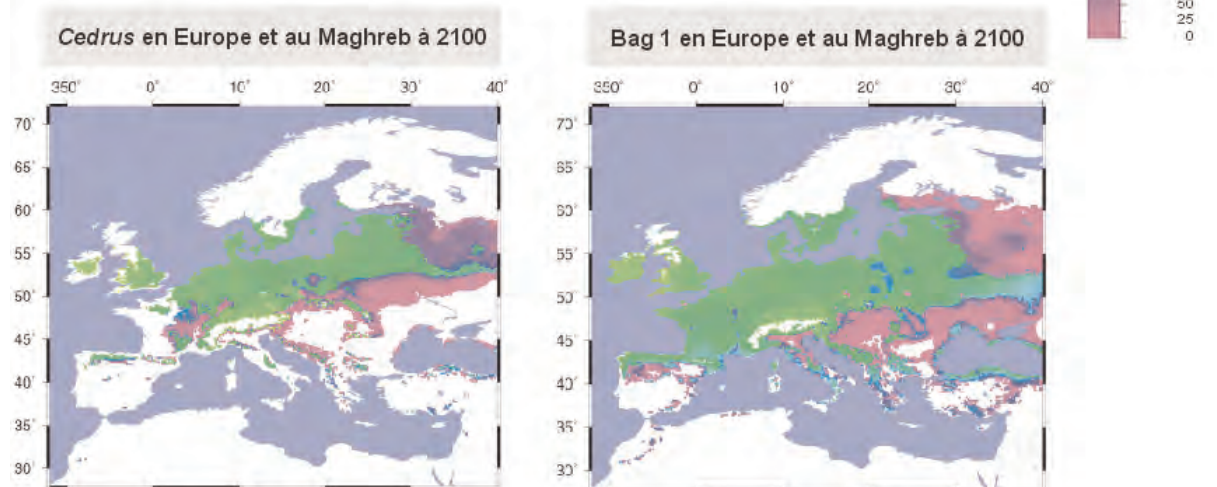


Figure 21: aire de distribution potentielle du Cèdre et du Bag 1 à 2100 avec 368 ppm de CO<sub>2</sub>

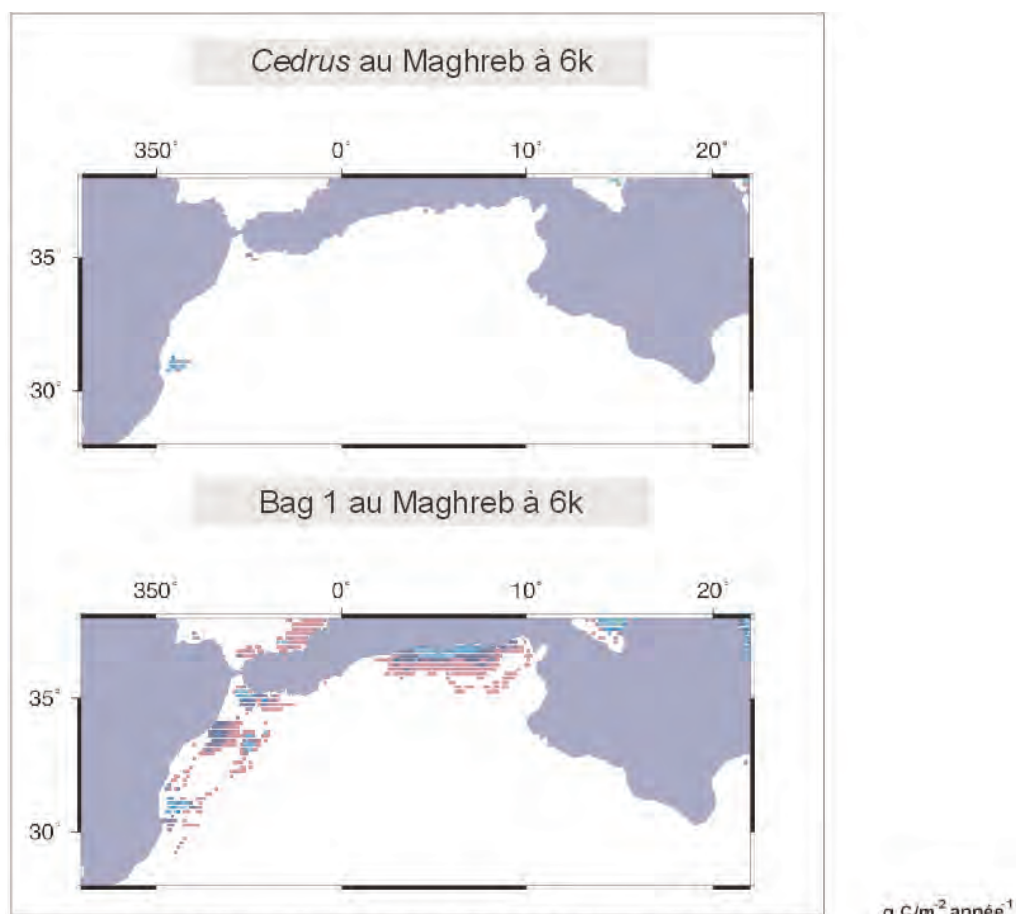


Figure 22: distribution potentielle à 6k au Maghreb (Cèdre et Bag 1) avec 265 ppm de CO<sub>2</sub>

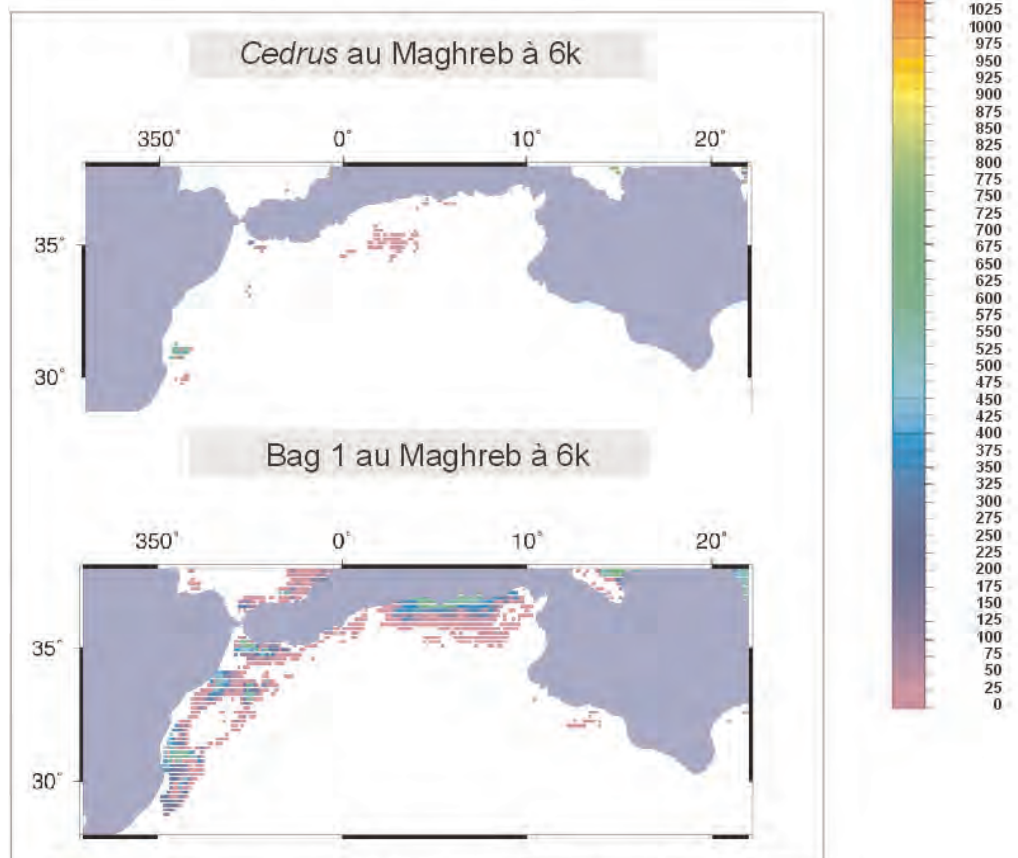


Figure 23: distribution potentielle à 6k au Maghreb (Cèdre et Bag 1) avec 368 ppm de CO<sub>2</sub>



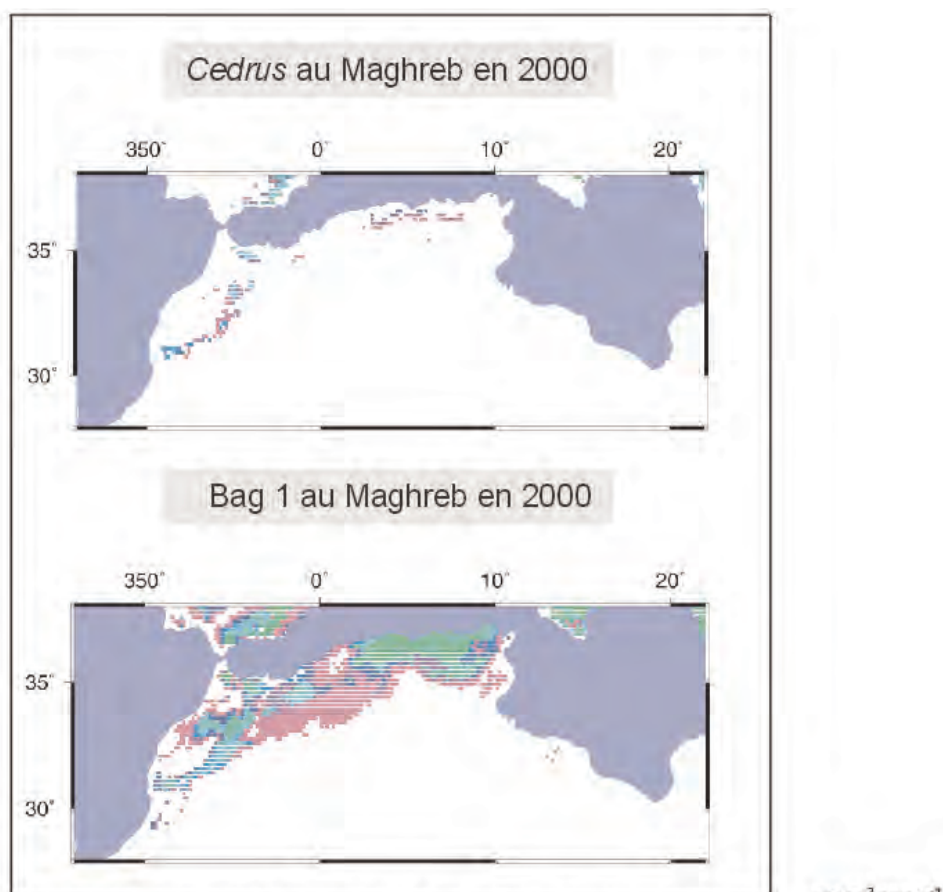


Figure 24: distribution potentielle en 2000 au Maghreb (Cèdre et Bag 1) avec 280 ppm de CO<sub>2</sub>

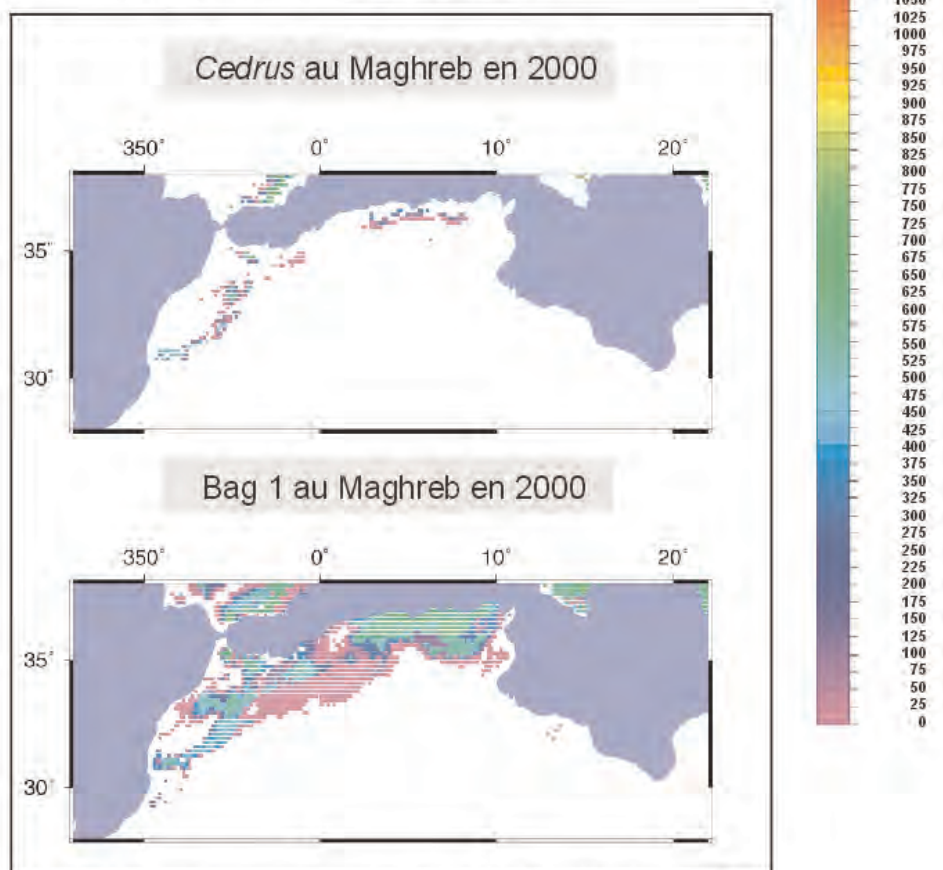


Figure 25: distribution potentielle en 2000 au Maghreb (Cèdre et Bag 1) avec 368 ppm de CO<sub>2</sub>

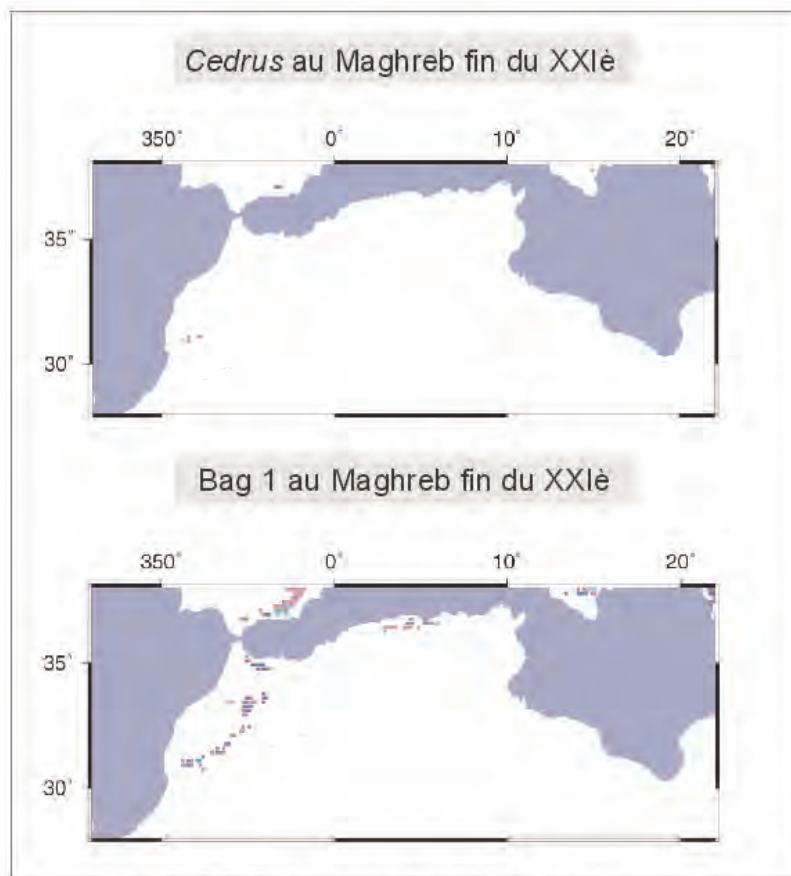


Figure 26: distribution potentielle en 2100 au Maghreb (Cèdre et Bag 1) avec 368 ppm de CO<sub>2</sub>

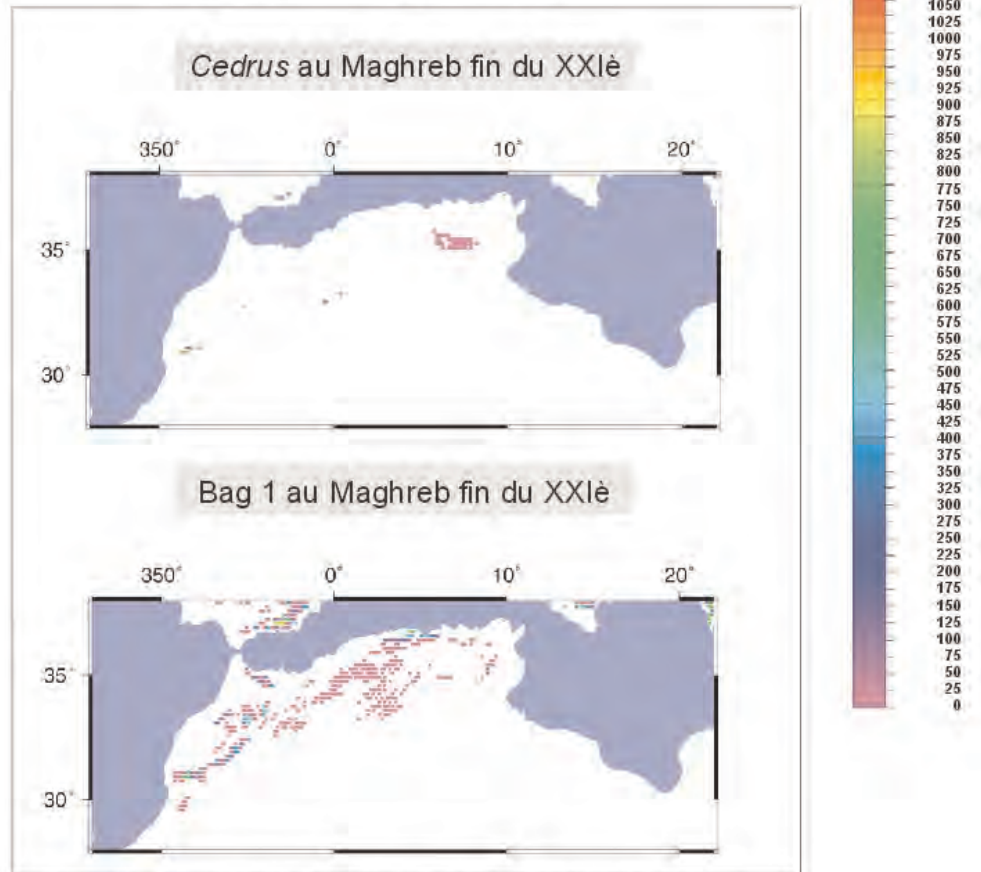


Figure 27: distribution potentielle en 2100 au Maghreb (Cèdre et Bag 1) avec 750 ppm de CO<sub>2</sub>



froide (-15°C en janvier et 6°C en juillet) et c'est toujours le pourtour méditerranéen qui présente les maxima de température (de 20°C en janvier à 42°C en juillet dans le Sahara). En fait, plus aucun pays du Maghreb ne voit sa moyenne de températures pour le mois de janvier descendre sous les 3° à 4°C.

Le régime des précipitations est fort affecté. Le pourtour méditerranéen subit une diminution des celles-ci. L'Afrique du Nord a tendance à s'aridifier. Le relief montagneux de cette région n'est même plus soumis aux précipitations durant le mois de juillet. Par contre, cette situation a tendance à s'inverser en remontant vers le nord. Pour les régions situées au-delà du 45<sup>ème</sup> - 50<sup>ème</sup> parallèle, il pleut plus durant les mois les plus froids et les diminutions de précipitations sont faibles durant les mois les plus chauds

### *Aire actuelle (en 2000) de distribution potentielle de Cedrus atlantica*

#### *Commentaires*

La simulation de référence est obtenue en appliquant un taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en 2000 de 368ppm. Cette concentration est issue du rapport de l'IPCC (2001). La concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a bien évidemment une incidence sur la croissance et donc la biomasse des végétaux. La variable de sortie du modèle CARAIB représentant la croissance est la productivité primaire nette (NPP) exprimée en g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>. Pour mieux cerner l'impact du CO<sub>2</sub>, une simulation avec le taux de CO<sub>2</sub> préindustriel (280ppm) a été effectuée.

A la figure 18 et à la figure 20 sont reproduites les cartes de production primaire nette (NPP) pour l'espèce *Cedrus atlantica* et du BAG 1 obtenues avec des concentrations en CO<sub>2</sub> de 368 ppm et 280 ppm. Un zoom sur la région du Maghreb est repris aux figures 24 et 25. Une remarque s'impose à la vue de l'étendue de l'aire simulée. Son importance provient du fait que le modèle simule des aires potentielles et non réelles. Le Cèdre peut donc ne pas être présent à certains endroits qui indiquent pourtant une productivité primaire nette significative. Par contre, l'inverse pourrait invalider la simulation. Dans ce cas-ci, le modèle simule bien les différents territoires où sont réellement présents les cèdres (cfr. « Situation géographique actuelle »). Des NPP significatives (d'environ 400 à 800 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>) sont simulées dans l'Atlas, le Rif, le sud de la France et l'Italie.

La quantité d'eau dans le sol, qui peut s'avérer parfois être un facteur limitant de la végétation, est une autre sortie intéressante du modèle CARAIB. Les cartes d'eau dans le sol sont reprises à la figure 17.

#### *Afrique du Nord*

*Cedrus atlantica* est bien simulé sur l'ensemble de son aire naturelle. Le Rif et le Moyen Atlas montrent les productivités primaires nettes les plus importantes (550 à 600 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>). Elles sont moins élevées (de 0 à 350 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>) dans les montagnes algériennes qui abritent l'arbre. Ces chiffres sont un peu faibles en comparaison des valeurs de NPP simulées pour la partie occidentale du Haut Atlas d'où le Cèdre est pourtant absent.

L'absence du Cèdre de l'Atlas en Tunisie, constatée dans la réalité, est également simulée par le modèle. Les températures s'étant réchauffées depuis le dernier glaciaire, les faibles altitudes qu'offre la Tunisie ne lui auraient plus permis de satisfaire un Tmax germ de 3,2°C (cfr. figure 18 et tableau 6). Sa disparition de ce pays serait donc essentiellement due à une modification du climat plutôt qu'à une pression anthropique trop forte.

Un dernier point qu'il est bon de souligner est la présence simulée du cèdre dans les Monts de Beni Snassen et de Tlemcen, vers la frontière nord entre le Maroc et l'Algérie. Si actuellement, il ne pousse plus de cèdres dans ces endroits, il est intéressant de constater que cette espèce est potentiellement viable dans ces montagnes. Ces Monts auraient donc pu servir de voies de communication entre des cédraies réfugiées au Maroc ou en Algérie, et ce, à

différentes époques de l'Holocène, voire du Pléniglaciaire moyen et supérieur.

## Europe

L'aire potentielle de *Cedrus atlantica* en Europe est beaucoup plus étendue que son aire réelle qu'elle inclut entièrement. Ces aires réelles, la France méridionale, excepté le nord du Massif central, le centre de l'Italie et certains territoires de Hongrie et de Bulgarie, comme le long de la Mer Noire, sont associées aux NPP les plus importantes (plus de 600 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>).

Le modèle simule la présence de *Cedrus atlantica* sur la majorité des terres comprises entre 38° et 48° de latitude nord. Le nord de l'Espagne (Galice, Pays-Basque et Catalogne) et du Portugal, une grande partie de la France, de l'Italie, de la Slovénie et de la Croatie constituent les endroits où sa NPP potentielle est la plus élevée. Par contre, si le climat des montagnes nord-africaines convient bien au cèdre, il n'en va pas de même pour les plus hautes chaînes de montagnes européennes comme les Pyrénées, les Alpes ou encore les Carpates. Ces zones, tout comme le nord de l'Europe sont en effet trop froides pour que le Cèdre y soit viable (cfr. figure 18 et tableau 6).

## Espèce et BAG

D'une manière générale, il est intéressant de voir que l'aire de *Cedrus atlantica* n'est pas simulée le long des côtes nord-africaines, au contraire du Bag 1 qui y est bien représenté. Cela est également vrai pour une bonne partie des côtes européennes. En fait, ce sont les deux pins du BAG, *Pinus halepensis* et *Pinus pinaster*, qui influencent la présence du BAG dans ces zones plus chaudes, au contraire de *Cedrus atlantica* qui se satisfait de températures moins élevées.

## Influence du CO<sub>2</sub>

La comparaison des cartes de NPP pour des concentrations de 368 et 280 ppm en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère illustre l'importance de l'impact de la concentration de ce gaz d sur la productivité des végétaux. La différence de 88ppm entraîne, dans ce cas, des augmentations de NPP pouvant atteindre 200 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>. Il convient cependant de nuancer cette conclusion. Le modèle considère que les plantes disposent de tous les nutriments nécessaires pour leur croissance. Or, dans la réalité, le manque de nutriments est un facteur limitant qui, dans certains cas, peut être important et empêche ainsi les végétaux de se développer au maximum de leurs possibilités. Dans le modèle, le manque d'azote, par exemple, impliquerait une diminution de la teneur en azote foliaire (et donc du Vcmax) qui est un paramètre fixé à sa valeur moyenne actuelle.

## Aire de la distribution potentielle de *Cedrus atlantica* à 6000 B.P.

### Commentaires

Une fois le traitement des données du GCM UBRIS-HadCM3M2 réalisé pour qu'elles puissent être utilisées par le modèle IBM et CARAIB, une modélisation peut être lancée. Le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de la simulation de référence doit être modifié à 265ppm (FRANCOIS et al., 1999). Cette concentration est obtenue à partir de carottes de glace (INDERMÛLE et al., 1999) des régions polaires.

A la figure 18 sont reproduites les cartes de production de NPP pour *Cedrus atlantica* et pour le BAG 1 avec une concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de 265 ppm. La figure 19 donne une simulation pour une concentration de 368 ppm. Un zoom sur l'Afrique du nord est également proposé (Figures 22 et 23) tout comme les cartes d'eau dans le sol pour les mois de janvier et juillet (Figure17).

La situation simulée à 6k est très différente de l'actuelle. La présence de *Cedrus atlantica* n'est plus renseignée qu'en trois lieux d'Afrique du Nord. Des taux de NPP importants sont simulés dans plusieurs régions d'Europe, mais il est peu probable que le Cèdre s'y trouvait. En effet, le Cèdre n'y avait probablement pas de refuge glaciaire et il est probablement resté cantonné dans les montagnes nord-africaines (CHEDDADI, comm.pers. 2006).

#### Afrique du Nord

Au cours de l'Atlantique, le climat plus chaud qui régnait semble moins bien convenir au Cèdre. Il ne subsiste que dans quelques refuges. La simulation le renseigne, au Maroc, dans les montagnes du Rif et dans la partie occidentale du Haut Atlas et en Algérie, dans les montagnes de Kabylie.

Cette distribution est en accord avec les données polliniques existant pour cette époque (cfr. « Holocène »). En effet, le Cèdre disparaît de Tunisie à l'Atlantique. En Algérie, les derniers pollens de *Cedrus atlantica* sont datés de 7960 B.P. pour le site de la Châtaigneraie. Au Maroc, REILLE (1977) le considère comme présent dans le Rif et le Haut Atlas, bien que la datation de ses enregistrements polliniques n'ait pas pu être effectuée précisément. Concernant le Moyen Atlas, des pourcentages significatifs ne sont atteints sur le site de Tigalmamine qu'au début du Subboréal.

#### Europe

Comme pour la simulation actuelle, l'aire de distribution potentielle du Cèdre de l'Atlas en Europe est très étendue. Or, comme il a été dit plus haut, le Cèdre n'avait probablement pas de refuge glaciaire en Europe et n'a donc certainement jamais colonisé ce continent.

L'aire potentielle à 6k est simulée plus au nord avec un décalage d'environ 5° de latitude par rapport à la situation actuelle. Cette différence résulte en partie des températures plus élevées qui caractérisent cette époque de l'Atlantique. Le nord de la France et de la Belgique, avec des NPP de 550 à 600 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>, auraient alors pu constituer des endroits propices à l'installation de *Cedrus atlantica*.

#### Espèce et BAG

Les remarques émises au point « Espèce et BAG » concernant l'implantation du BAG le long des côtes restent valables pour sa répartition européenne. En Afrique du Nord, il y est moins présent et remonte plus en altitude. Le climat plus chaud à 6k aurait en fait repoussé *Cedrus atlantica* vers quelques refuges, tandis que *Pinus halepensis* et *Pinus pinaster* auraient pu occuper certaines des zones laissées libres par le Cèdre.

#### Influence du CO<sub>2</sub>

L'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> provoque des augmentations de NPP pouvant être significatives (par exemple un accroissement de 200 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup> dans la partie occidentale du Haut Atlas). Pour 368ppm de CO<sub>2</sub>, on observe que la productivité du Cèdre devient significative dans le Moyen Atlas, l'Anti-Atlas et dans une région importante du nord de l'Algérie. Ces régions n'étaient donc pas inhospitalières pour le Cèdre. Des cédraies centenaires qui y auraient été implantées avant que le climat ne se réchauffe auraient probablement pu y subsister sans se développer davantage.

## Aire future (en 2100) de la distribution potentielle de *Cedrus atlantica*

### Commentaires

Le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère appliqué pour la simulation de référence en 2100 est de 750ppm. Cette concentration, en accord avec le scénario A2 de l'IPCC (2001), est deux fois plus importante qu'en 2000 et ne sera donc pas sans effets sur la productivité des végétaux. Une simulation avec une concentration de 368 ppm permet de juger de cet effet (Figure 21).

Comme pour les deux simulations précédentes, une carte de référence avec une concentration en CO<sub>2</sub> de 750 ppm est proposée (Figure 18). Sont annexées celles de la NPP du Maghreb pour des concentration en CO<sub>2</sub> de 368 et 750ppm (Figures 26 et 27) et, pour l'Europe et le Maghreb, celles de l'eau dans le sol en janvier et juillet (Figure 17).

Si le scénario A2 est respecté, les modifications dans la répartition de l'aire de distribution potentielle du Cèdre de l'Atlas seront considérables. Sa présence en Afrique du Nord et dans le reste de son aire de présence réelle sera fortement menacée. Il n'y subsistera plus que dans certains îlots. Par contre, en Europe du Nord sa NPP atteindra des valeurs extrêmement importantes (supérieures à 1000 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>). Cette situation présente quelques analogies avec ce qui s'est déroulé à 6000 B.P. Il convient cependant de garder à l'esprit que les changements climatiques prévus sont plus importants et se dérouleront sur une période de temps beaucoup plus brève. De plus les cartes d'eau dans le sol montrent que, pour le bassin méditerranéen, la fin de ce siècle sera beaucoup plus aride qu'elle ne l'a été à 6000 B.P.

### Afrique du Nord

*Cedrus atlantica* supporte mal l'accentuation de la sécheresse et l'augmentation des températures en Afrique du Nord. Il n'est plus simulé que sur une infime partie de son aire naturelle, dans le Moyen Atlas, dans le Massif de l'Aurès et dans les Monts de Belezma et ce, avec des NPP extrêmement faibles (inférieures à 25 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>). Il disparaît du Rif, de la partie orientale du Haut Atlas et des montagnes du nord de l'Algérie. La partie occidentale du Haut Atlas pourrait constituer son seul refuge réellement viable.

### Europe

Le climat de l'Europe du Nord semble admirablement bien convenir au Cèdre. Le modèle simule son aire potentielle sur la presque totalité des territoires compris entre le nord des Alpes et la pointe sud de la Suède. Les Ardennes et le sud de l'Allemagne montrent les NPP les plus importantes (supérieures à 1000 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>). Il semble aussi en mesure de s'implanter dans les Pyrénées et les Carpates. Par contre, il abandonne les régions du sud de la France, de l'Italie, de la Hongrie et de la Bulgarie qui lui conviennent bien aujourd'hui. D'une manière générale, c'est tout le pourtour de la Méditerranée qui ne lui convient plus vraiment.

A nouveau, il est bon de rappeler que les aires simulées sont potentielles. En réalité, il est impossible que les peuplements de *Cedrus atlantica* se déplacent, de manière naturelle, en moins d'un siècle, sur plusieurs milliers de kilomètres pour ainsi suivre leur aire potentielle. En effet, abstraction faite des barrières naturelles, le Cèdre ne disperse pas ses graines suffisamment loin (cfr. « Cycle de reproduction ») que pour atteindre de telles distances. Des boisements entrepris par l'homme sont indispensables pour que le cèdre s'implante dans ces régions.

### Espèce et BAG

En Afrique du Nord, la situation rappelle celle de 6k, mais de manière encore plus accentuée. Le BAG quitte les côtes et occupe les zones montagneuses. On est fort près de la



distribution actuelle du Cèdre. En Europe, mises à part les zones les plus au sud et au nord, et à quelques exceptions près comme les Alpes, il est simulé sur l'ensemble du territoire.

Les comparaisons entre le BAG 1 et l'espèce *Cedrus atlantica* pour les différentes simulations semblent indiquer que la distinction entre les deux pins du BAG et le Cèdre est possible. Les deux pins traduisent en effet des températures plus chaudes, à l'inverse du Cèdre qui affectionne des climats plus froids. Cette hypothèse pourrait être vérifiée en simulant les aires de distribution potentielle de *Pinus halepensis* et *Pinus pinaster*.

### Influence du CO<sub>2</sub>

L'influence de la forte concentration en CO<sub>2</sub> prévue pour le scénario A2 n'est pas négligeable. Si l'on observe la carte des NPP, on remarque qu'une importante concentration en CO<sub>2</sub>, même égale à celle d'aujourd'hui, ferait que la partie occidentale du Haut Atlas deviendrait le seul endroit d'Afrique du Nord où le Cèdre posséderait encore une productivité significative. A cet égard, les disponibilités en nutriments prennent ici encore plus d'importance que pour la situation actuelle.

## CONCLUSIONS

Il ne fait aucun doute qu'au cours de ce siècle, la terre connaîtra de brusques changements climatiques. Inévitablement, ces modifications auront des conséquences sur la répartition des différentes espèces végétales qui peuplent notre planète. Ce travail avait pour objet l'une d'entre elles : *Cedrus atlantica*, l'espèce noble des montagnes du Maroc et de l'Algérie. Il proposait d'étudier la réponse du Cèdre de l'Atlas aux changements climatiques d'hier et de demain.

Différentes recherches ayant pour but de mieux cerner l'écologie de *Cedrus atlantica*, ont été menées. Celles-ci avaient pour objectifs de proposer des simulations reposant sur des données précises et fiables.

La première tâche fut la réalisation d'une carte de la distribution réelle du Cèdre de l'Atlas au Maroc. Celle-ci fut établie d'après des cartes de types de peuplements aux 1/25.000<sup>ème</sup> conservées par le Ministère marocain des eaux et forêts. La carte ainsi créée permet de définir les paramètres de tolérance climatique du Cèdre de l'Atlas nécessaires aux simulations.

Une autre partie du travail a consisté à définir le seuil de pourcentage pollinique à partir duquel les échantillons contenant des pollens de *Cedrus atlantica* sont autochtones ou allochtones. Après l'étude de 514 échantillons palynologiques marocains, ce seuil est fixé à 1%. Il permet de mieux aborder l'étude des séquences fossiles contenant des pollens de Cèdre.

Enfin, trois modélisations de l'aire de distribution potentielle de *Cedrus atlantica* ont été réalisées à l'aide du modèle CARAIB : une pour le passé (à 6000 B.P.), une pour l'actuel (en 2000) et une pour le futur (en 2100, selon le scénario A2 de l'IPCC). Elles montrent que le Cèdre réagit aux différents climats et concentrations en CO<sub>2</sub> caractéristiques de ces trois époques en présentant pour chaque période des aires de distributions potentielles et des NPP très différentes :

- à 6000 B.P., les températures plus élevées qu'actuellement poussent *Cedrus atlantica* à se réfugier vers les hautes altitudes que lui offrent notamment le Rif, le Haut Atlas et la Kabylie. Cette migration entraîne sa disparition de Tunisie et le morcellement de son aire de répartition. En Europe, son aire de distribution potentielle est très étendue. Mais le Cèdre n'y avait probablement pas de refuge glaciaire et n'a donc certainement pas colonisé ce continent à l'Atlantique.
- En 2000, le modèle simule bien les différents territoires où sont réellement présentes les cédraies. Celles-ci présentent des NPP significatives (de 400 à 800 g C m<sup>-2</sup> année<sup>-1</sup>). L'aire potentielle du Cèdre est beaucoup plus étendue que son aire réelle, notamment

en Europe entre 38° et 48° de latitude nord. Si le climat reste stable, le Cèdre pourrait constituer une espèce intéressante pour le reboisement des forêts de ces régions.

- En 2100, si le scénario A2 de l'IPCC se vérifie, les modifications dans les aires de distribution potentielle et réelle du Cèdre de l'Atlas seront considérables. L'Afrique du Nord deviendrait trop chaude et trop aride pour lui. Il ne pourrait trouver refuge que dans peu d'endroits de cette région. Par contre, le climat des territoires compris entre le nord des Alpes et le sud de la Suède, associé à la forte concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, pourrait admirablement lui convenir.

Le Cèdre est sensible à la fois à l'augmentation des températures ainsi qu'au stress hydrique et ceux simulés dans le cadre du scénario climatique A2 pourraient mettre sa pérennité en danger.

Si le réchauffement et l'aridification annoncés du Maghreb se confirment, les 160.000 ha de cédraies nord-africaines verront leur superficie très fortement diminuer. Il convient donc de renforcer les mesures de sauvegarde de cette espèce au Maroc et en Algérie afin de lui donner toutes les chances de survie sur le continent africain.

Le cas de l'Europe est un peu particulier. Premièrement, les zones qui lui conviennent bien et où il pousse actuellement seraient également menacées par les changements climatiques. Elles doivent donc faire l'objet d'une attention particulière. Deuxièmement, *Cedrus atlantica* n'est pas à même de s'implanter naturellement dans les régions qui lui conviendront le mieux. Celles-ci sont trop éloignées de son aire réelle actuelle. C'est à l'homme d'entreprendre les boisements nécessaires pour y assurer l'établissement du Cèdre de l'Atlas.

L'homme, par la pression qu'il exerce sur les cédraies et sur le climat en général, rend l'avenir de ces milieux incertain. Il devrait prendre pleinement conscience des risques qu'en-court *Cedrus atlantica* et qu'il oeuvre dans le sens de sa sauvegarde ; car si les cédraies venaient à dépérir, ce serait bien plus que des arbres qui disparaîtraient. Toute la faune et la flore que celles-ci abritent, ainsi que les hommes qui en vivent, seraient les victimes d'un véritable échec écologique

## BIBLIOGRAPHIE

- ACHHAL A., AKABLI O., BARBERO M., BENABID A., M'HIRIT A., PEYRE C., QUEZEL P. & RIVAS-MARTINEZ S. 1980. A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecologia mediterranea* 5: 211-249.
- AGWU C.O.C. & BEUG H.T. 1982. Palynological studies of marine sediments of the west african coast. *Meteor-Forschungsergebnisse* 36: 1-30.
- ANDREA C. & ROBERTO M. 1994. Growth performances of a thinned Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Man.) Stand. In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 282-293.
- BALL J.T., WOODROW I.E. & BERRY J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental condittions. In : BIGGINS J.(Ed.) Progress in photosynthesis research, 4. Nijhoff, Dordrecht. 221p.
- BALLOUCHE A. et DAMBLON F. 1988. Nouvelles données palynologiques sur la végétation holocène du Maroc. In : TISSOT C. Palynologie, écologie, paléoécologie : actes du Xe symposium de l'association des palynologues de langue française. *Travaux de la section scientifique et technique de l'Institut français de Pondichéry* 25 : 83-90.
- BEN TIBA B. & REILLE M. 1982. Recherches polle analytiques dans les montagnes de Kroumirie (Tunisie septentrionale) : premiers résultats. *Ecologia mediterranea* 8, (4): 75-86.
- BENABID A. 1982. Bref aperçu sur la zonation altitudinale de la végétation climacique du Maroc. *Ecologia mediterranea* 8: 301-315.
- BENABID A. 1994. Biogéographie phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas à *Cedrus atlantica* (Manetti). In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 62-76.
- BERNARD J. & REILLE M. 1987. Nouvelles analyses polliniques dans l'Atlas de Marrakech, Maroc. *Pollen et spores* 29, 2-3 : 225-240.

- BRUN A. 1979. Recherches palynologiques sur les sédiments du golfe de Gabès : résultats préliminaires. *Géologie méditerranéenne* 6, (1) : 247-264.
- BRUN A. 1989. Microfiores et paléovégétation en Afrique du Nord depuis 30 000 ans. *Bulletin de la Société géologique de France* 5, (1) : 25-33.
- CHEDDADI R. 2004. Changements environnementaux du Nord-Ouest de l'Afrique : passé, présent et futur. In : SEMAH A.M. & RENAULT-MISKOWSKI J. *L'évolution de la végétation depuis deux millions d'années*. Editions Artcom'. 104-125.
- CHEDDADI R., LAMB H.F., GUIOT J. & van der KAARS S. 1998. Holocene climatic change in Morocco : a quantitative reconstruction from pollen data. *Climate dynamics* 14 : 883-890.
- CHEDDADI R., GUIOT J. & JOLLY D. 2001. The Mediterranean vegetation: what if the atmospheric CO<sub>2</sub> increased ? *Landscape ecology* 16: 667-675.
- COLLATZ G.J., RIBAS-CARBO M. & BERRY J.A. 1992. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Australian journal of plant physiology* 19: 519-538.
- COUVERT M. et ROCHE J. 1978. L'environnement de la Grotte de Taforalt durant la fin du paléolithique et l'Epipaléolithique. Le tapis végétal et son interprétation climatique. *BAM* 11: 1.
- CSABA M. 1994. Results of introduction trials with *Cedrus atlantica* in Hungary. In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 220-222.
- DAMBLON F. 1989. Les recherches palynologiques au Maroc : état et perspectives. In : Premier symposium de palynologie africaine, 15 - 21 May 1989, Rabat.
- DELKOV A. & GROZEV O. 1994. Résultats de l'introduction du *Cedrus atlantica* Manetti en Bulgarie du Sud-Ouest. In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 174-185.
- DIAZ S. & CABIDO M. 1997. Plant functional types and ecosystem function in relation to global change. *Journal of vegetation science* 8 : 463-474.
- DUBOIS-LAURENT J.M. 2005. Dynamique spatiale et temporelle de la végétation en France de 21 000 cal BP à 2100. Thèse de doctorat, Montpellier, Université de Montpellier II. 273 p, inédit.
- EL FETTAH N. 2003. Vers une redéfinition du référentiel géodésique Marocain. In : 2<sup>nd</sup> FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco. 11p.
- EL YOUSFI M. 1994. La santé du Cèdre de l'Atlas au Maroc. In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 594-611.
- EMBERGER L. 1939. Aperçu général sur la végétation au Maroc. Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1 : 150000. *Veröffentlichungen des geobotanischen forschungsinstituts Rübel in Zürich*, 14.
- ERDTMAN, G. 1960. The acetolysis method, a revised description. *Swensk Botanisk Tidskrift* , 54: 561-564
- FABRE J.P. 1994. Etat actuel des connaissances sur les ravageurs originaires de l'aire naturelle des cèdres parvenus en France, colonisation par les insectes d'un nouvel écosystème forestier. In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 540-551.
- FARJON A. 1990. *Pinaceae : drawings and descriptions of the genera Abies, Cedrus, Pseudolarix, Keteleeria, Nothotsuga, Tsuga, Cathaya, Pseudotsuga, Larix and Picea*. Koeltz scientific books. 330 p.
- RARQUHAR G.D., von CAEMMERERC S. & BERRY J.A. 1980. A biogeochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149 : 78-90.
- FRANCOIS L.M. 2004. Simulating vegetation dynamics with the CARAIB model. In : MILMO meeting Brussels, November 16-17. Power point. 31 p.
- FRANCOIS L.M. 2006. Modélisation géochimique et changements globaux du passé. Université de Liège. Notes de cours (power point), inédit.
- FRANCOIS L.M., CHRISTINE D., WARNANT P. & MUNHOVEN G. 1998. Modelling the glacial-interglacial changes in the continental biosphere. *Global and planetary change* 16-17: 37-52.
- FRANCOIS L. M., GODDERIS Y., WARNANT P., RAMSTEIN G., de NOBLET N. & LORENZ S. 1999. Carbon stocks and isotopic budgets of the terrestrial biosphere at mid-Holocene and last glacial maximum times. *Chemical geology* 159 : 163-189.

- FRANCOIS L.M., LAURENT J.M., CHEDDADI R., FAVRE E., SUC J.P., UTESCHER T. & MICHEELS A. 2006. Paleovegetation modelling with the CARAIB model. *In* : Open workshop on methods of quantitative climatic and environmental reconstruction based on temporal and spatial data. Guangzhou, China, June 12-14. Power point, 34p.
- HUBERT B., FRANCOIS L., WARNANT P. & STRIVAY D. 1998. Stochastic generation of meteorological variables and effects on global models of water and carbon cycles in vegetation and soils. *Journal of hydrology* 212-213: 318-334.
- I.G.N. 2006. *Carte touristique. Maroc*. Edition 1. 1:800 000 et 1:2 500 000. Ostfildern, Mairs Geographischer Verlag. 1 carte.
- INDERMÜHLE A. 1999. Holocene carbon-cycle dynamics based on CO<sub>2</sub> trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398 : 121-126.
- I.F.N. 2001. Volume sur pied de cèdre de l'Atlas en m<sup>3</sup> par région forestière nationale ; France. 1 carte, inédit.
- I.P.C.C. 2001. Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse. Genève, Suisse, GIEC. 184 p.
- LAMB H. F., GASSE F., BENKADDOUR A., EL HAMOUTI N., van der KAARS S., PERKINS W.T., PEARCE N.J. & ROBERTS C.N. 1995. Relations between century-scale Holocene arid intervals in tropical and temperate zones. *Nature*, 373 : 134-137.
- LANGROGNET 1997. Grand Atlas Gallimard pour le XXI<sup>e</sup> siècle. Paris, Nouveaux loisirs. 334 p.
- LANIER L. 1994. Les champignons des cédraies en Algérie. *In* : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 27 (spécial) : 554-563.
- LASRAM M. 1994. Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 27 (spécial) : xxxv-xxxvi.
- LAURENT J.M., BAR-HEN A., FRANCOIS L., GHISLAIN M. & CHEDDADI R. 2004. Refining vegetation simulation models : From plant functional types to bioclimatic affinity groups of plants. *Journal of vegetation science* 15 : 739-746.
- MAGRI D. & PARRA I. 2002. Late quaternary mediterranean pollen records and african winds. *Earth and Planetary science letters* 200, (3-4): 401-408.
- M'HIRIT O. 1994. Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva Mediterranea "Le Cèdre". *In* : Le cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 4-21.
- M'HIRIT O. 1999. Le grand livre de la forêt marocaine. Belgique ; Mardaga Ed. 280p.
- MICHELE B. 2001. Natural durability, physical and mechanical properties of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) wood from Southern Italy. *Annals of forest science* 58: 607-613.
- MICHELIN 2003. Algérie, Tunisia. Motoring & tourist map. 1:1 000 000. Paris, Michelin. 1 carte.
- MOUNA M. 1994. Etat des connaissances sur l'entomofaune du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica* Manetti) au Maroc. *In* : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 514-526.
- NEW M., LISTER D., HULME M. & MAKIN I. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate research*, 21: 1-25.
- OTTO D., RASSE D., KAPLAN J., WARNANT P. & FRANCOIS L. 2002. Biospheric carbon stocks reconstructed at the Last Glacial Maximum : comparison between general circulation models using prescribed and computed sea surface temperatures. *Global and Planetary change*, 33: 117-138.
- PANDOLFI M 1996. Fruit as a winter feeding resource in the diet of Stone marten (*Martes foina*) in east-central Italy. *Z. Säugetierkunde*, 61: 215-220.
- PENNMAN H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the royal Society of London*, A193: 120-145.
- PONS A. & QUEZEL P. 1958. Premières remarques sur l'étude palynologique d'un guano fossile du Hoggar. *Comptes rendus des séances de l'Académie de Sciences*, 244: 2290-2292.
- PMIP2 2005. Paleoclimate modelling intercomparison project phase II. PMIP2. Site internet <http://www-Isce.cea.fr/pmip2/>, visité le 05/09/2006.
- QUEZEL P. 1980. Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. *In* PESSON : Actualités d'Ecologie forestière. Paris, Bordas. 205-256.
- RAVEN P. H., EVERT R.F. & EICHHORN S.E. 2000. Biologie végétale. Paris, Bruxelles, De Boeck Université, 1<sup>ère</sup> édition. 944 p.



- REILLE M. 1977. Contribution pollenanalytique à l'histoire holocène de la végétation des montagnes du Rif (Maroc septentrional). Supplément au Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire, 50 : 53-76.
- ROCHE E. 2006. Palynologie de la région méditerranéenne. Université de Liège. Notes de cours, inédit.
- SALAMANI M. 1993. Premières données paléophytogéographiques du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans la région de Grande Kabylie (NE Algérie). *Palynosciences*, 2 : 147-155.
- SAXTON K.E., RAWLS W.J., ROMBERGER J.S. & PAPENDICK R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil science Society of America journal*, 50: 1031-1036.
- STAMBOULI-ESSASSI 2002. Etude palynologique en Tunisie septentrionale et reconstitution de l'évolution de l'environnement de 40.000 ans à l'époque actuelle. Thèse de doctorat, Faculté des sciences. Université de Liège. 116 p + 21 planches d'annexe, inédit.
- TARRIER M. & DELACRE J. 2006. La cédraie dans tous ses états. In : Le Maroc, un royaume de biodiversité. Paris, Ibis Press. Sous presse.
- TILL C. 1985. Recherches dendrochronologiques sur le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) carrière) au Maroc. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université Catholique de Louvain, 231 p et annexes, inédit.
- TOTH J. 1994. Le cèdre de l'Atlas en France : croissance et production dans les dispositifs anciens. In : Le Cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 -11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial) : 322-335.
- TOTH J. 2005. Le Cèdre de France. Etude approfondie de l'espèce. Paris, L'Harmattan. Biologie, Ecologie, Agronomie. 207 p.
- WARNANT P. 1999. Modélisation du cycle du carbone dans la biosphère continentale à l'échelle globale. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences. Université de Liège. 276 p, inédit.
- WARNANT P., FRANCOIS L., STRIVAY D. & GERARD J.C. 1994. CARAIB : A global model of terrestrial biological productivity. *Global biogeochemical cycles* 8, (3). 255-270.
- ZOBLER L. A. 1986. A world soil file for global climate modeling. NASA technical memorandum 87802, NASA Goddard Institut for Space Studies (GISS), New York.

